



---

# OPTIMIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PIEZAS DE PLA FABRICADAS MEDIANTE TÉCNICAS ADITIVAS

---

Trabajo Fin de Grado



Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales  
*Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química*

SEPTIEMBRE DE 2014

UC3M

Profesor: Javier Hidalgo García  
Alumno: Alberto Juan Alburquerque



## AGRADECIMIENTOS

---

*En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor, Javier Hidalgo, por haber aceptado guiarme en este trabajo antes incluso de conocerme, y por toda la ayuda que me ha ofrecido durante su realización. También tengo que dar las gracias a Antonio Relaño, por haberme allanado la búsqueda de tutor y por la bobina donada para fabricar las muestras; a mi tío, por haberme cortado el marco para la impresora; y a Jorge, por haberme impreso las piezas y aconsejado durante el montaje.*

*Por otro lado, llegar hasta aquí no hubiese sido posible sin el apoyo, como no, de mis padres, partícipes de mi evolución como persona, y ayuda fundamental en esta última recta en la carrera. También quiero acordarme de mi hermano, abuela y el resto de mi familia, especialmente de mi abuelo Guillermo, que ha sido el que más cerca se ha quedado de verme presentar este trabajo. Aunque no haya sido futbolista, ni médico, ni abogado, sé que se sentiría orgulloso.*

*Tras mencionar a la familia, vienen los amigos. Como no quiero excederme de párrafos, englobaré a muchos de los más importantes en Paradinas, porque aunque ya se quede pequeña, acoge a gente muy grande, también los que venimos de fuera, y espero que siempre siga siendo así. De la Universidad, mencionaré a Ñako y Diego y toda la gente que me acogió cuando me cambié de Grado, sin olvidar a los que se quedaron en el otro. No puedo cerrar este párrafo sin acordarme de Laura, que ya me venía acompañando y lo ha seguido haciendo durante casi todos estos cuatro años de carrera.*

*Por último, muy especialmente, a Carlos, porque cada día mi mente te dedica al menos unos segundos, y muchas veces me pregunto en qué hubiese consistido tu trabajo fin de grado.*





# CONTENIDO

---

<b><i>Índice de ilustraciones</i></b> .....	<b>1</b>
<b><i>Índice de tablas</i></b> .....	<b>5</b>
<b><i>Resumen</i></b> .....	<b>7</b>
<b><i>Abstract</i></b> .....	<b>9</b>
<b>1 Estado del arte</b> .....	<b>11</b>
1.1 Introducción .....	11
1.2 Historia.....	11
1.3 Tecnologías actuales de manufactura aditiva .....	14
1.4 Modelado por deposición fundida .....	19
1.4.1 Origen y fundamentos .....	19
1.4.2 Descripción del proceso de modelado por deposición fundida .....	20
1.5 RepRap, el origen. Impresoras 3D FDM Open-Source .....	22
1.5.1 Las primeras impresoras “FFF” Open-Source .....	22
1.5.2 Serie Prusa. La Prusa i3 .....	23
1.6 Tipos de impresoras FFF. Clasificación por la estructura mecánica .....	24
1.7 Partes mecánicas de una impresora 3D Cartesiana.....	26
1.7.1 El cabezal móvil .....	27
1.8 Materiales y Aplicaciones.....	29
1.8.1 Principales materiales empleados en el Modelado por Deposición Fundida .....	29
1.8.2 Comparación de ABS y PLA en referencia a su uso en el FDM .....	31
1.8.3 Aplicaciones relevantes del PLA .....	33
1.9 Parámetros de impresión relevantes en la FDM .....	34
<b>2 Motivación y planteamiento de objetivos</b> .....	<b>39</b>
<b>3 Proceso experimental</b> .....	<b>41</b>
3.1 Materiales .....	41
3.2 Equipos y metodologías .....	42
3.2.1 Diseño factorial completo .....	42
3.2.2 Diseño y fabricación de las probetas .....	46
3.2.3 Ensayos a tracción de las probetas .....	52
3.2.4 Medida de la densidad .....	56
3.2.5 Microscopía estereoscópica .....	59
3.2.6 Microscopía electrónica de barrido .....	59
3.2.7 Análisis térmico .....	60
<b>4 Resultados</b> .....	<b>63</b>
4.1 Dimensiones de las probetas y análisis visual.....	63
4.2 Ensayos a tracción.....	67
4.2.1 Resultados de tensión .....	69
4.2.2 Resultados de deformación .....	70

4.2.3	Módulos de elasticidad.....	71
4.2.4	Apreciaciones .....	72
<b>4.3</b>	<b>Análisis factorial .....</b>	<b>74</b>
<b>4.4</b>	<b>Medidas de la densidad .....</b>	<b>78</b>
4.4.1	Picnometría de Helio .....	78
4.4.2	Método de Arquímedes.....	78
<b>4.5</b>	<b>Microscopía estereoscópica .....</b>	<b>80</b>
<b>4.6</b>	<b>Microscopía electrónica de barrido.....</b>	<b>82</b>
<b>4.7</b>	<b>Análisis térmicos.....</b>	<b>85</b>
<b>5</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>89</b>
<b>6</b>	<b>Líneas futuras.....</b>	<b>91</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>93</b>
	<b>Anexos.....</b>	<b>99</b>

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Patente de Blather para fabricar mapas en relieve</i>	11
<i>Ilustración 2. Fotoescultura en el estudio de Willème</i>	12
<i>Ilustración 3. Reproducción de la fotoescultura de Willème</i>	12
<i>Ilustración 4. Photo-Glyph Recording de Munz</i>	12
<i>Ilustración 5. Herramienta hecha por Nakagawa (sin terminar)</i>	13
<i>Ilustración 6. Cronograma del origen de los procesos aditivos</i>	13
<i>Ilustración 7. Clasificación de las tecnologías de fabricación aditivas</i>	14
<i>Ilustración 8. Tipos de materiales básicos y compuestos</i>	15
<i>Ilustración 9. Esquema del sistema ideado por Crump [10]</i>	19
<i>Ilustración 10. Diagrama de flujo para fabricar una pieza en 3D</i>	20
<i>Ilustración 11. Proceso de modelado por deposición fundida (esquemático) [12]</i>	20
<i>Ilustración 12. Pieza (hélice) en varias etapas del proceso de fabricación [13]</i>	21
<i>Ilustración 13. Pieza con material de soporte [13]</i>	21
<i>Ilustración 14. Extracción material de soporte [13]</i>	21
<i>Ilustración 15. Primera Darwin y su descendiente [52]</i>	23
<i>Ilustración 16. RepRap modelo Darwin [53]</i>	23
<i>Ilustración 17. RepRap modelo Mendel [54]</i>	23
<i>Ilustración 18. Prusa iteración 3 [56]</i>	23
<i>Ilustración 19. Prusa iteración 2 [18]</i>	23
<i>Ilustración 20. Prusa Mendel [55]</i>	23
<i>Ilustración 21. Black Edition de LeapTo3D [59]</i>	24
<i>Ilustración 22. PowerCode de Mecano [60]</i>	24
<i>Ilustración 23. Hephestos de Bq [58]</i>	24
<i>Ilustración 24. Configuraciones más frecuentes en robots industriales [19]</i>	25
<i>Ilustración 25. Modelo Smarttrap [51]</i>	25
<i>Ilustración 26. Modelo Rostock [50]</i>	25
<i>Ilustración 27. Esquemático de una impresora 3D FDM tipo Prusa i3</i>	26
<i>Ilustración 28. Partes del cabezal móvil de extrusión [23]</i>	27
<i>Ilustración 29. Hot-end E3D v5</i>	28
<i>Ilustración 30. Cuerpo del extrusor</i>	28
<i>Ilustración 31. Hobbed bolt</i>	28
<i>Ilustración 32. Cabezal móvil montado</i>	28
<i>Ilustración 33. Componentes del ABS</i>	29
<i>Ilustración 34. Unidad estructural del polímero PLA</i>	30
<i>Ilustración 35. Ratios de emisión de UFPs en impresoras FDM de escritorio [28]</i>	32
<i>Ilustración 36. Tipos de relleno empleados en el FDM</i>	35
<i>Ilustración 37. Relación entre la altura de capa, orientación de las caras y apariencia final.</i>	36
<i>Ilustración 38. Interpretación geométrica de la integral de Riemann</i>	36
<i>Ilustración 39. Esquemático sobre la distancia adecuada de separación entre el nozzle y la cama de impresión</i>	37
<i>Ilustración 40. Proceso experimental</i>	41
<i>Ilustración 41. Bobina de PLA Natural 3.00 mm empleada</i>	41
<i>Ilustración 42. Modelado de la probeta ISO 527-2/1B en SolidWorks 2013.</i>	47
<i>Ilustración 43. Captura de Repetier Host. Probetas en la cama de impresión, vista de trayectorias.</i>	47
<i>Ilustración 44. Interfaz de usuario de Slic3r</i>	48
<i>Ilustración 45. Bloques de configuración de parámetros de impresión en Slic3r</i>	48
<i>Ilustración 46. Fotografía de la Prusa i3 montada y empleada en este trabajo</i>	49

Ilustración 47. Detalle del "warping" que se produjo durante la impresión con la base en frío	51
Ilustración 48. Detalle de los "surcos" producidos por imprimir con el nozzle tocando la cama de impresión	51
Ilustración 49. Detalle de las probetas de la combinación 13	51
Ilustración 50. Fotografía de todas las probetas ordenadas y clasificadas	52
Ilustración 51. Máquina de ensayos universal "Shimadzu Autograph AG-I"	52
Ilustración 52. Detalle de una probeta recién ensayada	53
Ilustración 53. Curvas típicas de esfuerzo/deformación [37]	53
Ilustración 54. Balanza de precisión Satorius CP64	57
Ilustración 55. Microscopio estereoscópico OLYMPUS SZ-CTV	59
Ilustración 56. Interacción de electrones de alta energía con muestras solidas [42]	60
Ilustración 57. Muestras recubiertas de oro para su caracterización en el SEM	60
Ilustración 58. Medidas características de la probeta [36]	63
Ilustración 59. Desviaciones absolutas de l3	64
Ilustración 60. Desviaciones absolutas de b2	64
Ilustración 61. Desviaciones absolutas de b1	64
Ilustración 62. Desviaciones absolutas de h	64
Ilustración 63. Tuercas empotradas en una pieza impresa	65
Ilustración 64. Comparación de las medidas de l3 y h	66
Ilustración 65. Comparación de las medidas de h y b2	66
Ilustración 66. Comparación de las medidas de b1 y h	67
Ilustración 67. Ampliación de la zona de estabilización del ensayo	68
Ilustración 68. Muestra de una de las curvas $\sigma$ - $\epsilon$ obtenida en los experimentos	68
Ilustración 69. Tensiones máximas medias de cada combinación y media total	69
Ilustración 70. Deformaciones máximas medias de cada combinación y media total	70
Ilustración 71. Curvas esfuerzo-deformación de las muestras del Exp#1	71
Ilustración 72. Dispersión de los módulos de elasticidad calculados	72
Ilustración 73. Curvas de las probetas que aguantaron mayor y menor tensión máxima	72
Ilustración 74. Probeta al inicio del ensayo	73
Ilustración 75. Probeta justo antes de romper	73
Ilustración 76. Esquema de la estructura de hilos en la probeta	73
Ilustración 77. Esquema aplicando una fuerza de tracción	73
Ilustración 78. Diagrama de Pareto estandarizado para la tensión máxima	74
Ilustración 79. Tensión media sin y con ventilador	75
Ilustración 80. Tensión media a 30 y 60 mm/s	75
Ilustración 81. Tensión media. Cama a 24,2 y 70 °C	75
Ilustración 82. Tensión media. Nozzle a 195 y 215 °C	75
Ilustración 83. Diagrama de Pareto estandarizado para las deformaciones máximas	77
Ilustración 84. Densidades de las muestras por el método de Arquímedes	79
Ilustración 85. Comparativa entre las medidas realizadas con laca o sin laca	80
Ilustración 86. Captura lateral Exp#3	81
Ilustración 87. Captura lateral Exp#4	81
Ilustración 88. Captura lateral Exp#6	81
Ilustración 89. Captura lateral Exp#12	81
Ilustración 90. Planta sup. Exp#6	82
Ilustración 91. Planta sup. Exp#7	82
Ilustración 92. Planta sup. Exp #9	82
Ilustración 93. Panorámica frontal del área de fractura Exp#2	83
Ilustración 94. Panorámica frontal del área de fractura Exp#7	83
Ilustración 95. Ampliación Exp#2. Izquierda	84
Ilustración 96. Ampliación Exp#2. Centro	84

<i>Ilustración 97. Zonas de adhesión entre hilos</i>	84
<i>Ilustración 98. Despegue parcial entre diferentes capas</i>	84
<i>Ilustración 99. Ampliación Exp#7. Centro</i>	85
<i>Ilustración 100. Ampliación Exp#7. Derecha</i>	85
<i>Ilustración 101. Curvas de DSC y TGA y ampliación de zona</i>	85
<i>Ilustración 102. Curvas obtenidas por Dong. La curva (a) corresponde al PLA</i>	86
<i>Ilustración 103. Curvas obtenidas con los ensayos isotérmicos</i>	87
<i>Ilustración 104. Probeta reducida en vertical</i>	91
<i>Ilustración 105. Curva <math>\sigma</math>-<math>\epsilon</math> para dos probetas impresas en vertical</i>	91



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa de los principales procesos de prototipado rápido comerciales en 2004. [3]	16
Tabla 2. Ventajas y limitaciones de la fabricación aditiva (AM) [7]	16
Tabla 3. Tecnologías más exitosas de fabricación aditiva	17
Tabla 4. Características técnicas del extrusor empleado	28
Tabla 5. Propiedades físico-mecánicas del ABS [24]	29
Tabla 6. Propiedades típicas del Ingeo™ Biopolymer 4032D de NatureWorks [27]	30
Tabla 7. Temperaturas típicas de impresión para ABS y PLA	31
Tabla 8. Comparativa entre ABS y PLA. Ventajas y desventajas.	32
Tabla 9. Relación de resolución y altura de capa en la impresora Witbox de Bq	37
Tabla 10. Factores y dominio experimental	43
Tabla 11. Matriz de experimentos y plan de experimentación	44
Tabla 12. Cálculo de los efectos para un experimento con tres factores	45
Tabla 13. Matriz de los efectos para un experimento con tres factores	45
Tabla 14. Especificaciones técnicas de la impresora Prusa i3 montada para el trabajo	50
Tabla 15. Características técnicas de la balanza de precisión Sartorius CP64	58
Tabla 16. Volumen específico del agua saturada a 295 y 300K	58
Tabla 17. Dimensiones características y valor medio de las medidas	63
Tabla 18. Módulos de elasticidad para cada combinación	71
Tabla 19. Efectos medidos a partir de los datos de tensión	74
Tabla 20. Condiciones mejores teniendo sólo en cuenta efectos principales	76
Tabla 21. Interacción CD entre los factores de temperatura de cama y nozzle	76
Tabla 22. Resultados obtenidos con el picnómetro	78
Tabla 23. Densidad de las muestras por el método de Arquímedes	78
Tabla 24. Densidad del filamento de PLA de partida	79
Tabla 25. Densidades de algunas muestras (recubiertas con laca)	80
Tabla 26. Parámetros resultantes para optimizar la resistencia a tracción	89





## RESUMEN

---

La impresión 3D es una tecnología que actualmente se encuentra en plena expansión. El auge mediático que está teniendo esta reciente tecnología es también una fuente de confusión, pues hay una gran variedad de tecnologías de fabricación que se pueden enmarcar bajo este nombre, tanto para materiales metálicos, poliméricos o cerámicos. En este trabajo se presentan y diferencian estas tecnologías, cuyo aspecto principal en común es la adición de material para lograr una pieza con volumen final. Es por esto que estas tecnologías se denominan como técnicas de fabricación aditiva.

Esta introducción sirve para enmarcar la técnica objeto de este trabajo, el modelado por deposición fundida. Esta técnica es la que se ha desarrollado dentro del movimiento *RepRap*, principal responsable de la expansión de la impresión 3D gracias a la reducción de costes que ha propiciado. Gracias a ello, ha sido posible la compra de componentes y montaje de un modelo *Prusa i3* para la elaboración del presente estudio. Los principales materiales que se vienen usando en las impresoras *RepRap* son el ABS y el PLA. Tras una presentación y comparación de los mismos, se verá como, aunque al inicio de este movimiento el termoplástico más usado fuera el ABS, la tendencia apunta hacia el uso masivo del PLA, debido a sus propiedades de biocompatibilidad y medioambientales.

La necesidad de conocer las propiedades mecánicas de piezas de PLA fabricadas mediante deposición fundida con una impresora *RepRap* es lo que ha motivado este trabajo. Este estudio establece una relación entre diferentes parámetros de impresión y las propiedades mecánicas en diferentes probetas fabricadas con este polímero biodegradable. Se estudió el efecto que provocan en las propiedades mecánicas de las piezas variar los parámetros de velocidad de impresión, temperatura del extrusor, temperatura de la base de impresión y uso de ventilador de capa. Para llevar a cabo el estudio se planteó un diseño de experimentos factorial  $2^4$  a dos niveles. Los resultados revelan la importancia de parámetros como la velocidad de impresión y temperaturas de procesado, y la poca influencia de la temperatura de extrusor o ventilador de capa en los resultados de tensión. Se calculó una tensión media entre todas las probetas ensayadas de 29,5 MPa y un módulo de elasticidad de 2,7 GPa.

Para ver cómo podían afectar estos diferentes parámetros en las propiedades de las piezas y pegado entre sus capas, se llevaron a cabo estudios sobre la densidad de las muestras, análisis térmicos y observaciones de microscopía estereoscópica y electrónica de barrido.



## ABSTRACT

---

Currently, 3D printing technologies are under intense development. The media hype surrounding this term is also a source of confusion and misunderstandings. There is a great variety of techniques that could be named as 3D printing, even for metal, polymeric or ceramic materials. This study gathers and explains the main *additive manufacturing* (AM) technologies. As the term itself says, the main common feature of these technologies is the addition of materials to get a final three-dimensional part.

After this introduction, the technique used in this study can be placed and identified. This technique is named *fused deposition modelling* (FDM) and is the technique developed parallel to the *RepRap* movement, despite it was renamed by *filament fused fabrication* (FFF). The *RepRap* project has made 3D polymer-based printers available to the public due to cost reduction. This cost reduction made it possible to purchase the materials and assemble a *Prusa i3* model to perform this work. *RepRap* printers fabricate objects primarily from ABS and PLA. This study details the main characteristics of these materials and emphasizes the tendency of fabricating increasingly with PLA and not with ABS. This is mainly motivated by PLA's eco-friendly and biocompatibility properties.

In order for PLA printed parts to be useful for biomedical, engineering and other applications, the mechanical properties of printed parts must be known. This study relates several printing parameters to some properties of the final part. The study quantifies the effects caused by the alterations of parameters such as printing speed, hot-end temperature, hot-bed temperature and the employment of layer fan. In order to do this a  $2^4$  factorial experiment with two levels was designed. Results reveal the importance of parameters such as the printing speed or hot-bed temperature in contrast with the low influence of the hot-end temperature and layer fan. Results also find average tensile strength of 29,5 MPa with average elastic modulus of 2,7 GPa.

Density calculations, thermal analysis, stereo microscope and scanning electron microscope (SEM) observations were conducted to evaluate the reasons of these results.



# 1 ESTADO DEL ARTE

## 1.1 INTRODUCCIÓN

La impresión 3D es una tecnología que actualmente se encuentra en plena expansión. El término impresión 3D copa las secciones tecnológicas de la mayor parte de los periódicos. El auge mediático que está teniendo esta reciente tecnología es también una fuente de confusión, pues hay una gran variedad de tecnologías de fabricación que se pueden enmarcar bajo este nombre, tanto para materiales metálicos, poliméricos o cerámicos.

Todas estas tecnologías comparten un factor común, que es la adición de material para lograr una pieza final. Es por esto que el término correcto que abarca todas estas técnicas es *Additive Manufacturing* (AM), traducido al español como “manufactura aditiva”, “fabricación aditiva” o “técnicas aditivas”. No obstante, los materiales, resultados y métodos de fabricación son muy dispares en cada una de ellas, por lo que es importante distinguir entre todos estos tipos de proceso de manufactura.

Cuando en los medios se habla de impresión 3D, la mayor parte de las ocasiones se alude a la técnica conocida como “**modelado por deposición fundida**”, **FDM** (*fused deposition modeling*), técnica objeto del presente trabajo y sobre la que se tratará en profundidad. No obstante, se considera necesario introducir los orígenes y fundamentos de las diferentes técnicas aditivas para poder contextualizar y diferenciar la FDM del resto de tecnologías.

## 1.2 HISTORIA

La manufactura aditiva tiene sus raíces en la **topografía** y la **fotoescultura**, que datan de hace casi 150 años. Estas dos tempranas técnicas, puramente manuales, sobre todo si las comparamos con las técnicas actuales, que alcanzan unos niveles de automatización y sofisticación muy elevados, tenían como objetivo crear un objeto con volumen y forma libre mediante una superposición de capas. [1]

La primera patente referente a la **topografía** fue propuesta por Joseph E. Blather en 1890 (*Ilustración 1*). Su método consistía en recortar las siluetas del relieve sobre placas de cera, de acuerdo a las líneas de cota, superponer todas ellas y suavizar las uniones. Se construía un positivo y un negativo del relieve para después comprimir entre ellas un papel y darle la forma deseada.

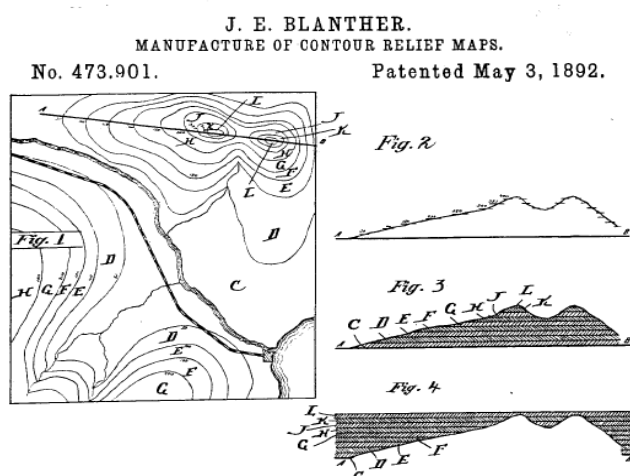


Ilustración 1. Patente de Blather para fabricar mapas en relieve

En cuanto a la **fotoescultura**, surgió en el siglo XIX como un intento de crear réplicas exactas de cualquier objeto tridimensional. El primero que logró llevar a cabo esta técnica con cierto éxito fue el francés François Willème en 1860. Como se muestra en la *Ilustración 2*, el sujeto se colocaba en el centro de la sala y era fotografiado por 24 cámaras diferentes separadas en igualdad angular. Después un artesano tallaba un cilindro, a escala 1/24 del original, empleando la silueta de cada fotografía, como se muestra en la *Ilustración 3*.

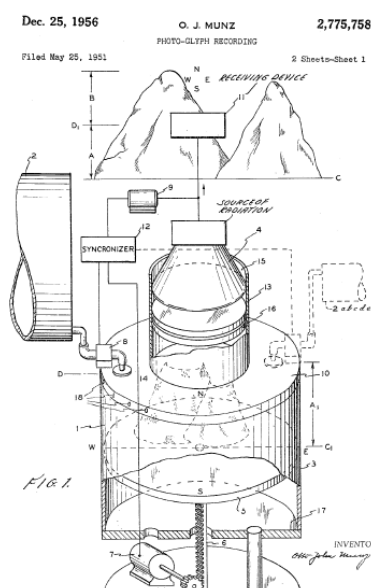


*Ilustración 2. Fotoescultura en el estudio de Willème*    *Ilustración 3. Reproducción de la fotoescultura de Willème*

Ambos procesos fueron evolucionando durante los años posteriores. En el caso de la topografía, evolucionaron los materiales con los que se conformaban las planchas y las técnicas de unión entre las mismas, introduciéndose láminas poliméricas, de papel o metálicas; y nuevos adhesivos, resinas o polímeros fotoendurecibles, respectivamente. Otro de los avances más relevantes en esta técnica fue la introducción del mecanizado para formar los relieves con planchas metálicas. En Japón, el profesor Nakagawa empezó a usar en 1979 técnicas de laminación para crear moldes y matrices y útiles para prensado, como el mostrado en la *Ilustración 5*.

A su vez, la fotoescultura fue perfeccionando el uso de la luz y polímeros fotosensibles para recrear los modelos de una forma más precisa y menos manual.

En el año 1951, se puede establecer el comienzo del desarrollo de las técnicas modernas de manufactura aditiva. En ese año, aunque el sistema se publicó en 1956 [2], Otto Munz propuso un sistema muy similar a lo que es hoy la Estereolitografía (SLA o SL, *Stereolithography*). Ideó un sistema para exponer selectivamente una emulsión fotográfica ordenada por capas, donde cada capa proviene de la sección transversal de un objeto escaneado. Bajando un pistón en un cilindro y añadiendo la cantidad apropiada de emulsión fotográfica y un agente fijador se van creando las capas. Tras exponer y fijar, el cilindro sólido y transparente resultante contiene una reproducción del objeto. Para extraerlo del cilindro, se puede tallar o atacarlo fotoquímicamente. El sistema se muestra en la *Ilustración 4*.



*Ilustración 4. Photo-Glyph Recording de Munz*

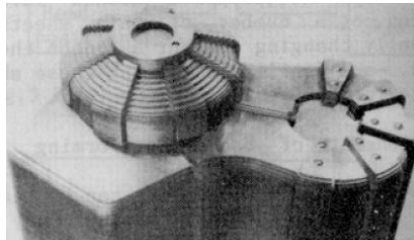


Ilustración 5. Herramienta hecha por Nakagawa (sin terminar)

El siguiente cronograma (*Ilustración 6*), obtenido de [1] aunque con algún añadido en cursiva, destaca los sucesos más relevantes en el desarrollo de las técnicas de fabricación aditivas desde su origen hasta el origen del movimiento *RepRap*, del que se hablará posteriormente, en 2005.

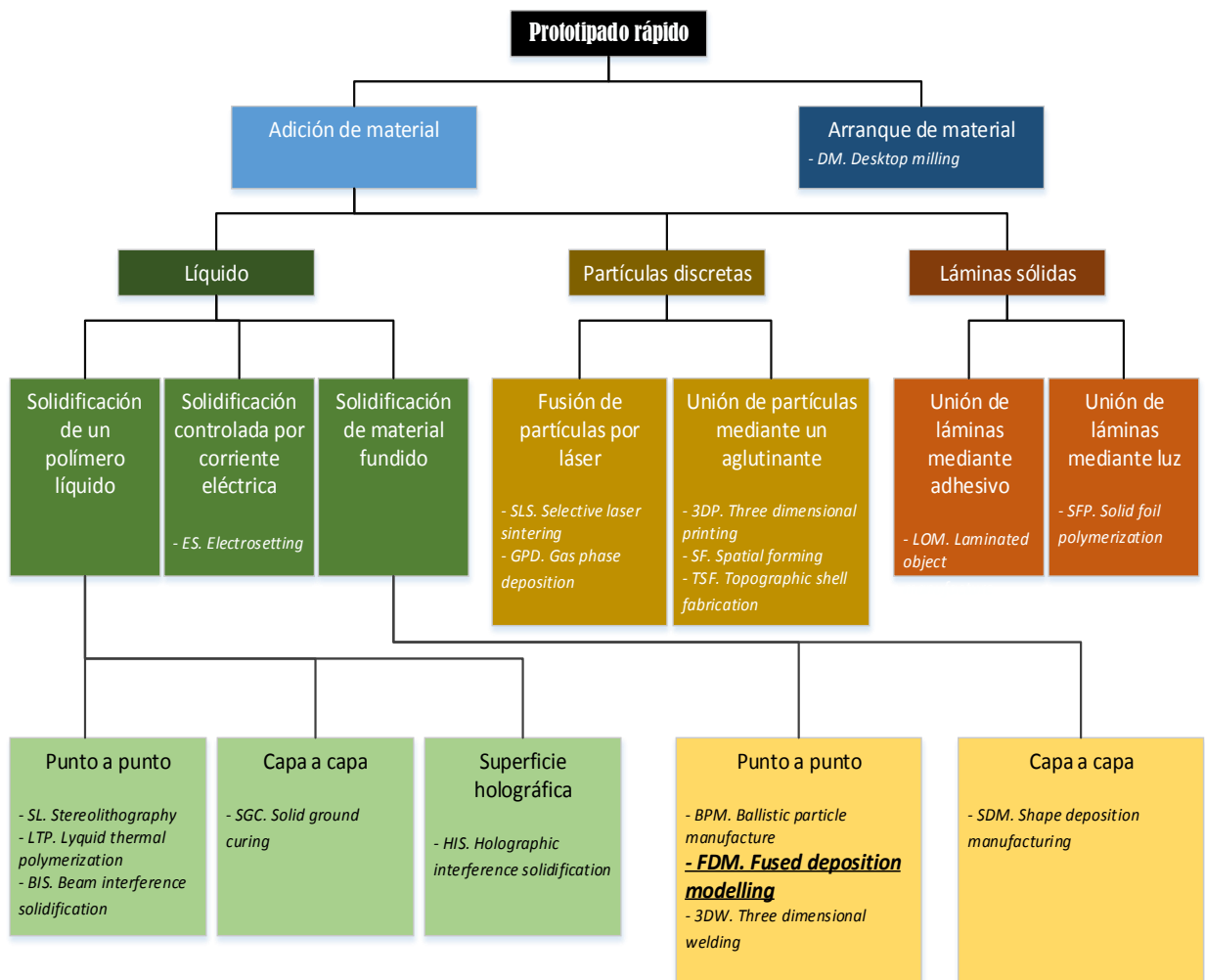
TOPOGRAPHY		PHOTOSCULPTURE	
Blanthier patent filed	1890	1860	Willeme photosculpture
Perera patent filed	1937	1902	Baese patent filed
Zang patent filed	1962	1922	Monteah patent filed
Gaskin patent filed	1971	1933	Morioka patent filed
Matsubara patent filed	1972	1940	Morioka patent filed
DiMatteo patent filed	1974	1951	Munz patent filed
Nakagawa laminated tool fabrication	1979		
	1969		Swainson patent filed
	1972		Ciraud patent filed
	1979		Housholder patent filed
	1981		Kodama patent filed
	1982		Herbert patent filed
	1984		Maruntani patent filed, Masters patent filed, Andre patent filed, Hull patent filed
	1985		Helysis founded, Denken venture started
	1986		Pomerantz patent filed, Fevqin patent filed, Deckard patent filed, 3D founded, Light Sculpting started
	1987		Fudim patent filed, Arcella patent filed, Cubital Founded, DTM founded, Dupont Somos venture started
	1988		First shipment by 3D, CMET founded, Stratasys founded
	1989		Crump patent filed, Helsinki patent filed, Marcus patent filed, Sachs patent filed, EOS founded, BPM Tech. founded
	1990		Levant patent filed, Quadrax founded, DMEC founded
	1991		Teijin Seiki venture started, Foeckele & Schwartze founded, Soligen founded, Meiko founded, Mitsui venture started
	1992		Penn patent filed, Quadrax acquired by 3D, Kira venture started, Laser 3D founded, First shipment by DTM
	1992		Sanders Prototyping started
	1995		Aaroflex venture started
	1997		AeroMet formed, Optomec restarted, ZCorp started
	1998		Object founded, Keicher patent filed
	1999		POM founded, BPM closed
	2000		Helisys closed, Solidica started
	2001		3D and DTM merge
	2005		<i>RepRap founded by Adrian Bowyer</i>

Ilustración 6. Cronograma del origen de los procesos aditivos

### 1.3 TECNOLOGÍAS ACTUALES DE MANUFACTURA ADITIVA

Desde la invención de las técnicas aditivas en tres dimensiones, su uso más extendido hasta hoy se localiza en el **prototipado rápido**, designado por sus siglas en inglés **RP (rapid prototyping)**. La posibilidad de fabricar prototipos de piezas a partir de modelos 3D diseñados por ordenador sin necesidad de construir caros moldes o matrices acorta y abarata el proceso de diseño de una nueva pieza para cualquier tipo de ensamble o conjunto mecánico. Como resultado de esta reducción temporal y económica en la construcción de un prototipo, se permite un mayor número de iteraciones. Esto significa que los diseñadores tienen libertad para fabricar un mayor número de reproducciones físicas de sus diseños, lo que les permite comprobar su funcionalidad y facilidad de montaje. Consecuentemente, los errores se minimizan y los costes de desarrollo del producto y tiempos de espera se reducen sustancialmente. Se dice que el RP puede reducir los costes de desarrollo hasta en un 70% y el *time-to-market* hasta un 90%. [3]

El siguiente esquema (*Ilustración 7*) muestra las técnicas empleadas en prototipado rápido, haciendo especial hincapié en la clasificación de las técnicas aditivas dependiendo del tipo de material de partida y el procesado.



*Ilustración 7. Clasificación de las tecnologías de fabricación aditivas*

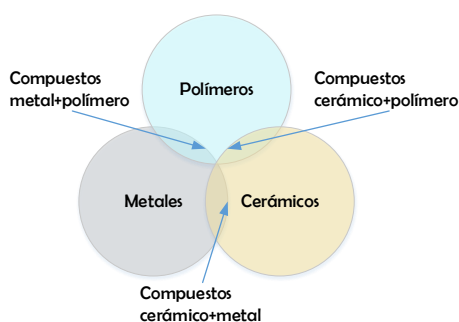


Como se presenta en el esquema, la disponibilidad de tecnologías es muy variada. Se han encontrado y comparado diversas clasificaciones ( [3], [4], [5]) y, a pesar de pequeñas divergencias, todas ellas presentan una división común en tres grandes bloques:

- **Líquid based** (Líquidos).
  - *Resinas fotocurables, ceras fundidas, tintas de relleno, agua.*
- **Powder based** (Partículas discretas).
  - *Materiales semicristalinos, plásticos, metales y cerámicos.*
- **Solid based** (Láminas sólidas).
  - *Láminas de metal, plástico y papel, hilo de plástico amorfo.*

Hay ligeras discrepancias respecto a la clasificación de la técnica que atañe a este trabajo, FDM. En el esquema (*Ilustración 7*) se abre una subdivisión en el bloque *Líquido* denominada *Solidificación de material fundido*. En otras clasificaciones ( [4] y [5]), la FDM se enmarca dentro del bloque *Solid based*. La deposición del material (normalmente termoplástico) se dice se realiza en estado *semi-sólido* o *semi-fundido*, ya que solidifica inmediatamente después de salir por la boquilla de extrusión, más adelante se explicará con detalle el proceso. En todo caso, esta pequeña discrepancia es comprensible y, en parte se debe a la predominancia de la unión de láminas en el bloque *Solid based*.

En referencia a los materiales para el AM, vemos que comprende la fabricación a partir materiales tanto poliméricos, cerámicos o metálicos (*Ilustración 8*). La fabricación mediante adición de material propicia la creación de materiales compuestos, principalmente mediante las técnicas de *sinterizado selectivo por láser (SLS)*, *consolidación por ultrasonidos (UC)* y *laminado de capas (LOM)* [5].



*Ilustración 8. Tipos de materiales básicos y compuestos*

Como es de esperar, cada una de estas tecnologías da como resultado piezas con diferentes características. Será pues, responsabilidad del usuario, seleccionar el método de fabricación adecuado a sus necesidades. Byun y Lee (2005), basándose en encuestas realizados a usuarios de tecnologías de AM, concluyen que los seis factores más decisivos para seleccionar el proceso adecuado son: **precisión, rugosidad de la superficie, resistencia a la tracción, elongación, coste unitario y tiempo de fabricación** [6]. En la *Tabla 1* se recogen las características de las principales técnicas de fabricación aditivas disponibles en el mercado en el año 2004.

Tabla 1. Comparativa de los principales procesos de prototipado rápido comerciales en 2004. [3]

	SL	SGC	BPM1	BPM2	MJM	FDM	SLS	3DP	TSF	LOM1	LOM2	LOM3	DM <sup>2</sup>
Postcuring required	Yes	No	No			No	No (firing may be required)	Yes	No	No			No
Supports required	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	No	No	No	No			No
Material used	Epoxy or acrylic resin	Resin	Thermo-plastic or wax	Thermo-polymer	Thermo-polymer	ABS, MABS, wax or elastomers	Nylon, metals, wax, or polycarbonate	Ceramic or metal	Sand and wax	Paper, plastic or ceramic	Paper	Paper or foam	Various
Laser used	Yes	No	No			No	Yes	No	No	Yes	No	No	No
Layer thickness ( $\mu\text{m}$ )	50	100–200	13–130	Not available	33	50–762	76	177	1270–3810	76–203	100	110–140	N/A
X-Y Resolution ( $\mu\text{m}$ )	200–250	100	101	558	85	254	Not available	508	12 700	203–254	25	Not available	10
Accuracy ( $\mu\text{m}$ )	$\pm 100$	$\pm 500$	$\pm 25$	$\pm 17$	$\pm 100$	$\pm 127$	$\pm 51$	$\pm 127$	Not available	$\pm 127$	$\pm 200$	Not available	$\pm 10$
Scan speed ( $\text{mm s}^{-1}$ )	N/A	N/A	310	12 000 particles per second	6200	380	0.001–0.008	0.007	Not available	508 (cutting speed)	N/A	Not available	60
Time to complete a layer (s)	113 ( $50 \times 50 \text{ mm}$ )		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Not available	N/A	60	N/A	N/A
Maximum part dimensions ( $\text{mm}^3$ )	$500 \times 500 \times 584$	$500 \times 350 \times 500$	$300 \times 150 \times 220$	$250 \times 203 \times 150$	$250 \times 200 \times 200$	$254 \times 254 \times 254$	$330 \times 380 \times 425$	$355 \times 457 \times 355$	$3353 \times 1829 \times 1219$	$813 \times 559 \times 508$	$400 \times 280 \times 300$	$610 \times 610^1$	$120 \times 100 \times 120$
Cost (£1000)	150–390	180–300	60	25	50	100	250–365	Bureau service only	Bureau service only	120–235	130	8.5	4.5

<sup>1</sup>Since prototypes made with the LOM3 system are assembled manually there is no height constraint.

<sup>2</sup>These figures refer to an entry-level system only.

Se han presentado los diferentes tipos de técnicas aditivas existentes. No obstante, a pesar de los evidentes avances que puede aportar a la industria por sus indiscutibles ventajas, existen limitaciones que hacen que las tecnologías AM no se hayan implantado aún de manera generalizada en muchos sectores [7]. Estas limitaciones son debidas, sobre todo, a la reciente introducción de la AM en la industria, cuyos procesos aún están en fase de perfeccionamiento, y al desconocimiento de los diseñadores en el desarrollo orientado a estos procesos. La siguiente tabla recoge las principales ventajas y limitaciones de la fabricación aditiva.

Ventajas	Limitaciones
Complejidad geométrica, personalización	Tecnologías AM en desarrollo
Libertad creativa	Procesos periféricos y auxiliares
Adaptación al mercado	Desconocimiento de los diseñadores
Acceso a nuevos nichos de mercado	Disponibilidad y coste de la materia prima
Mecanismos integrados	Acabado superficial
Reducción de peso, productos aligerados	Velocidad de fabricación
Reducción del <i>time to market</i>	Calidad del producto y repetibilidad del proceso
Reducción de costes de procesos intermedios	Tamaño limitado de piezas
Procesos híbridos	Coste de la maquinaria

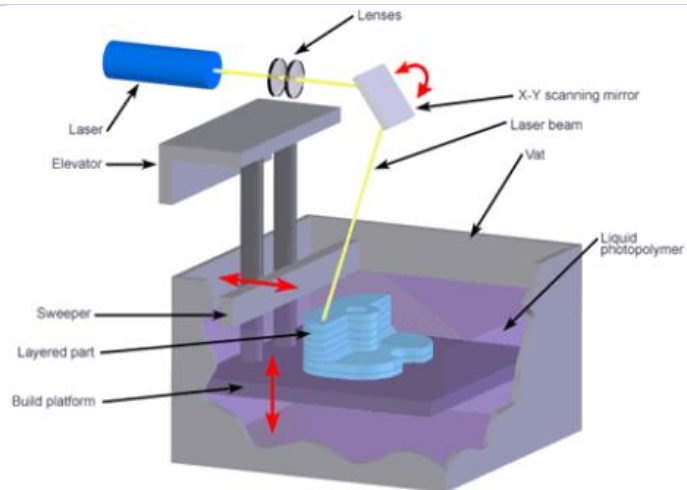
Tabla 2. Ventajas y limitaciones de la fabricación aditiva (AM) [7]

Debido a las citadas limitaciones de las AM, sobre todo al estado de desarrollo en que se encuentran muchos de sus procesos, sólo unas pocas están ampliamente extendidas y ocupan la mayor parte del mercado. En la *Tabla 3* [4] se recogen las mismas y sus principales características.

*Tabla 3. Tecnologías más exitosas de fabricación aditiva*

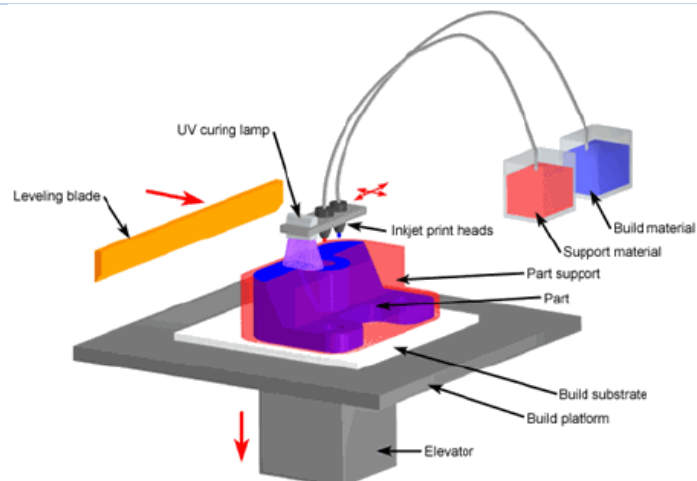
### **Estereolitografía (SLA)**

- Considerada la primera técnica de fabricación aditiva
- Patentada en 1986 y fabricada por *3D Systems* en 1987
- Polimeriza una resina fotocurable
- Espesor de capa de 100  $\mu\text{m}$



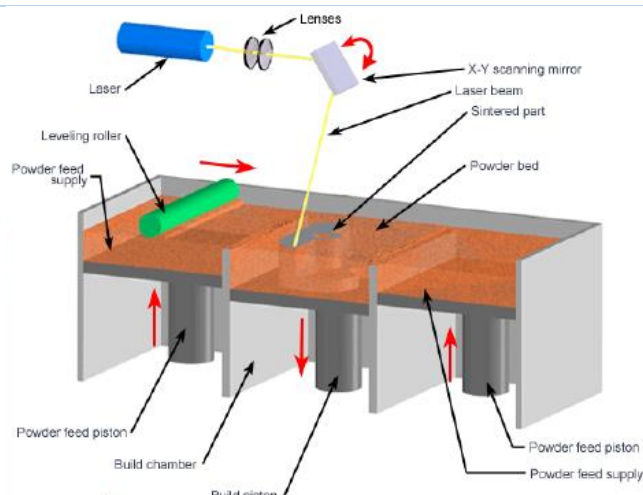
### **Polyjet**

- De la empresa Israelí Objet
- Patentada a finales de los 90 y comercializada a partir del 2000
- Resinas fotocurables de base acrilato
- Necesita soportes
- Materiales digitales



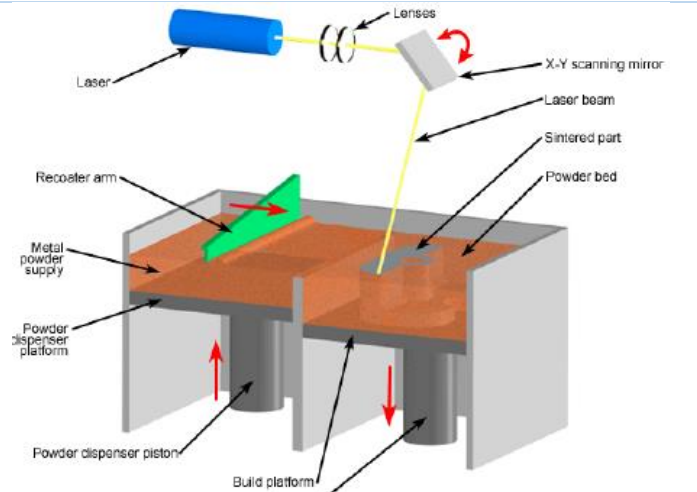
### **Selective Laser Sintering (SLS)**

- Patentada en 1979
- Comercializada en los 90
- Procesado de polímeros, metales y cerámicos
- Distribuida por *EOS GmbH*
- Permite espesor de capa de 100  $\mu\text{m}$
- Necesidad de recubrimiento en metales y cerámicos para ser sinterizados



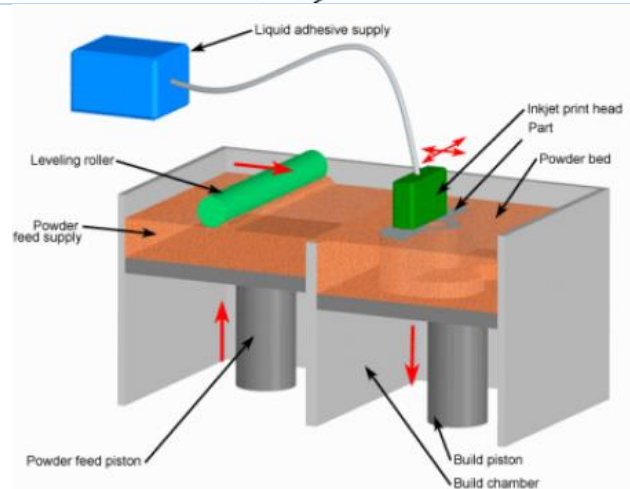
### Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

- Variación hecha por *EOS GmbH* a partir de SLS (90's)
- Combinaciones de varios metales sin recubrimiento



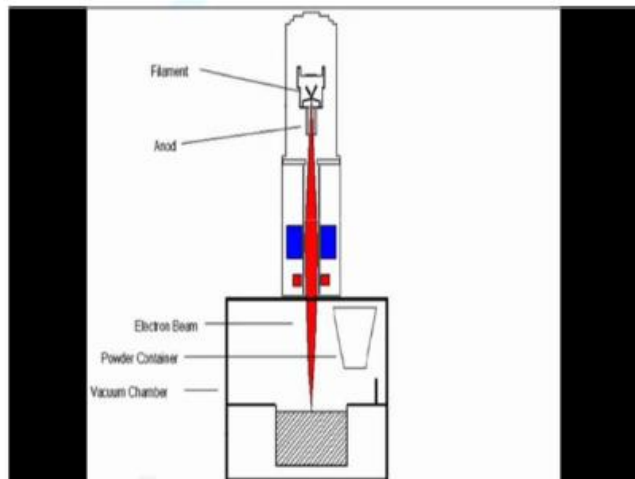
### Three Dimensional Printing (3DP)

- Patentada en el MIT
- Para mezclas de cerámicos
- Se usa en modelos y maquetas



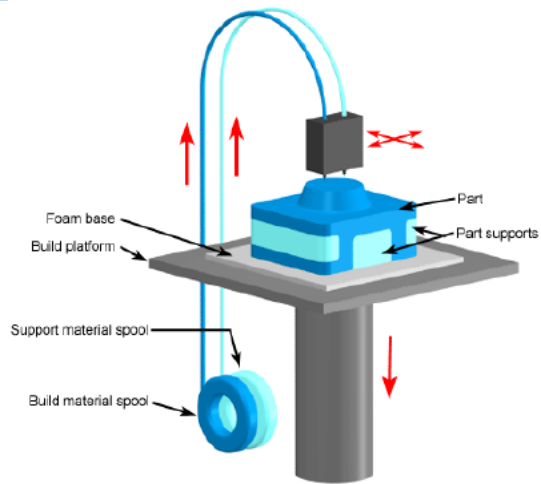
### Electron Beam Melting (EBM)

- Fabricada y comercializada por *Arcam* (1997)
- Funde polvo metálico de varias aleaciones, incluyendo las de Titanio
- Alta velocidad de producción por la potencia del haz de electrones y la posibilidad de guiarlo cambiando el campo magnético a través del cual pasa el haz.



### Fused Deposition Modeling (FDM)

- Comercializada por *Stratasys* en 1991
- Extrusión de hilos (polímeros)
- Es una de las tecnologías más extendidas y ha llegado a ser la más difundida
- Necesita soportes
- Varios tipos de termoplásticos

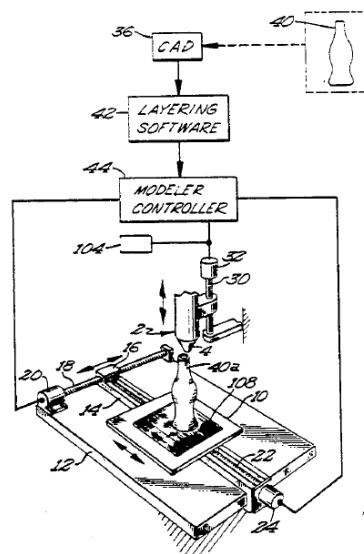


Hasta aquí se han presentado y diferenciado las diferentes técnicas de fabricación aditiva. También se han enunciado las características más relevantes de los procesos AM más exitosos. Todo ello ha servido para desgranar el término “impresión 3D”. El único proceso registrado literalmente con ese nombre (3DP™ – *Three Dimensional Printing*) es el patentado por el MIT [8]. No obstante, se concluye que el término “impresión 3D” podría sustituir al término “manufactura aditiva” (AM) ya que ambos se refieren a todo proceso capaz de crear piezas con un volumen definido mediante adición de material. Lo que es técnicamente incorrecto, y con frecuencia se produce, es denominar simplemente como “impresión 3D” a una técnica en concreto, pues, valga la redundancia, no se está indicando a qué tipo de impresión 3D se está refiriendo.

## 1.4 MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

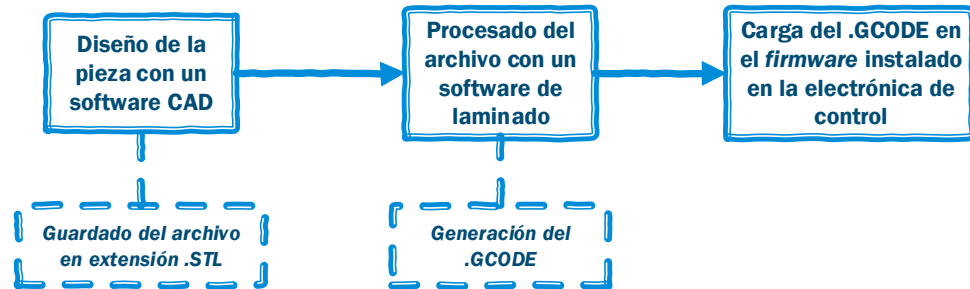
### 1.4.1 Origen y fundamentos

La FDM data de finales de los años 80 y su invención se atribuye a S. Scott Crump (*Ilustración 9*), ingeniero mecánico por la *Washington State University* y cofundador de *Stratasys Ltd.*, una de las empresas líderes en impresión 3D. [9]



*Ilustración 9. Esquema del sistema ideado por Crump [10]*

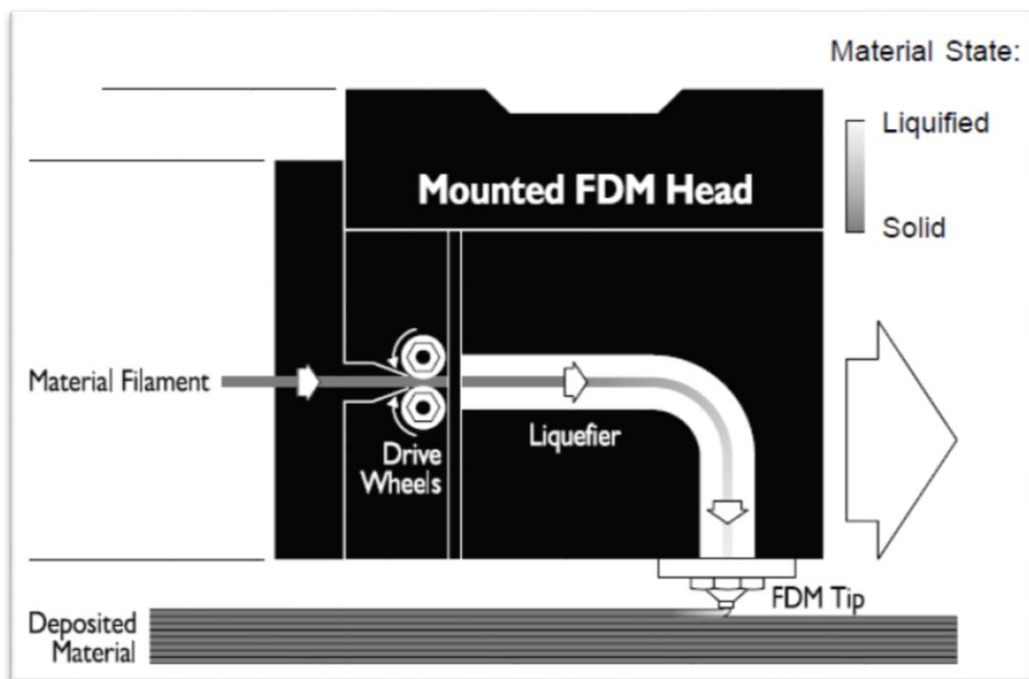
El modelado por deposición fundida requiere un proceso de diseño y traducción al lenguaje máquina de las piezas que se deseen fabricar. Este proceso (*Ilustración 10*) es análogo a todas las técnicas de AM, y las variaciones que pueda haber entre unas y otras depende del software y firmware empleado y de los actuadores que necesite cada máquina para trabajar.



*Ilustración 10. Diagrama de flujo para fabricar una pieza en 3D*

El proceso se describe a continuación. El objeto 3D primero se modela con algún programa CAD (*Computer Aided Design*) y se guarda en formato STL (*STereoLithography*). Este formato, creado por *3D Systems* para la técnica homónima, utiliza una malla de triángulos sobre las superficies para definir la forma de un objeto, y es el universalmente adoptado para la AM. Cuando se tiene el modelo en STL se procesa mediante un software de laminado (*slicing*) y se crea el *toolpath*, o senda que seguirá la herramienta de la máquina; en el caso de la FDM, la boquilla de extrusión. El *G-code* o código G es el nombre que recibe el archivo de texto con los comandos para hacer funcionar una máquina de control numérico (CNC). [11]

#### 1.4.2 Descripción del proceso de modelado por deposición fundida



*Ilustración 11. Proceso de modelado por deposición fundida (esquemático) [12]*

A continuación se presenta la traducción al castellano de la descripción de Crump de la FDM en su patente “Apparatus and method for creating three-dimensional objects” [10]:

*<<Aparato que incorpora un cabezal móvil dispensador (provisto de un suministro de material que solidifica a una temperatura predeterminada) y una base, los cuales se mueven relativamente entre sí a lo largo de los ejes “X”, “Y” y “Z” siguiendo un patrón predeterminado para crear objetos tridimensionales mediante la deposición controlada de material descargado desde el cabezal móvil sobre la base. El aparato está preferiblemente controlado por ordenador en un proceso que emplea software de diseño y fabricación asistido por ordenador (CAD-CAM) para generar señales de control y accionar el movimiento controlado del cabezal y la base mientras el material se está depositando.*

*La creación de objetos tridimensionales es posible mediante la deposición repetida de capas de material de solidificación hasta alcanzar la forma deseada. Son susceptibles de uso materiales que se adhieran a la capa anterior con una unión adecuada tras la solidificación; tales como: ceras autoendurecibles, resinas termoplásticas, metales fundidos, epoxis bicomponentes, espumas y vidrios. La base de cada capa se define por la capa anterior, y el grosor de capa se define y controla mediante la altura a la que la punta del cabezal móvil está situada sobre la capa precedente. >>*

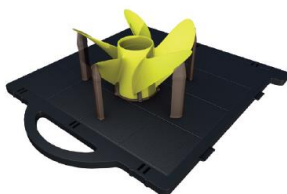
En resumen, el modelado por deposición fundida consiste en un cabezal de extrusión que se mueve en el espacio y va depositando material fundido que solidifica al ser depositado (*Ilustración 11*). Capa a capa se va formando el objeto deseado. Este material fundido suele ser un polímero termoplástico, aunque puede tratarse de otros materiales como los enumerados en el párrafo anterior.

En la siguiente imagen (*Ilustración 12*) se muestra una hélice fabricada mediante FDM en diferentes etapas de su fabricación.

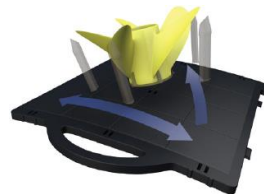


*Ilustración 12. Pieza (hélice) en varias etapas del proceso de fabricación [13]*

Otro aspecto importante de las impresoras FDM, sobre todo de las profesionales, es el uso extendido de dos o más boquillas de extrusión para poder así modelar con materiales diferentes. Uno de estos materiales es el material con el que se quiere fabricar la pieza. El otro es el denominado **material de soporte**, que sirve para sostener partes de la pieza en voladizo que no serían posibles de modelar de otro modo. Este material se quita de la pieza una vez finalizada, mediante métodos físicos o disolviéndolo el algún elemento que sólo ataque al material de soporte y no al propio material de la pieza (*Ilustración 13* e *Ilustración 14*)



*Ilustración 13. Pieza con material de soporte [13]*



*Ilustración 14. Extracción material de soporte [13]*



## 1.5 REPRAP, EL ORIGEN. IMPRESORAS 3D FDM OPEN-SOURCE

En el apartado 1.4 se han presentado los orígenes y fundamentos del modelado por deposición fundida, FDM. Como se ha visto, la técnica data de finales de los 80 y desde su origen, su uso está ampliamente extendido en el prototipado rápido. No obstante, los elevados precios de estas voluminosas máquinas industriales restringían su uso sólo a las grandes firmas de diseño industrial, con la financiación y el espacio necesario para su uso.

En 2004, existían diferentes modelos de impresoras 3D comerciales. Las dos compañías entonces líderes, *Dimension* y *Z Corporation* (ahora filiales de las grandes *Stratasys* y *3D Systems*, respectivamente) tenían más de 10 modelos en el mercado. Las ventas estimadas en 2004 ascendieron a 56 millones de euros - *un incremento de casi el 100% con respecto al año anterior*. En 2005, los precios de las máquinas más sofisticadas rondaban desde los 75.000 hasta los 375.000 euros, dependiendo de la técnica implicada. Para muchas compañías relacionadas con el desarrollo de productos, simplemente no era posible adquirir una de estas máquinas. También se sacaron al mercado un par de máquinas más pequeñas por unos 18.500€, aunque los costes de impresión en éstas eran superiores. [14] Por otro lado, en cuanto a impresoras 3D FDM de las clasificadas como comerciales, el modelo más barato encontrado es la serie *Mojo* de *Stratasys* [15], disponible desde hace aproximadamente un par de años por algo menos de 10.000 dólares [16].

Con este panorama en escena, la impresión 3D estaba muy limitada a la industria y al prototipado rápido, y no tenía, ni mucho menos, la difusión que tiene actualmente. El pionero en la liberización de la impresión 3D, en concreto la técnica de **modelado por deposición fundida (FDM)** fue el ingeniero mecánico **Adrian Bowyer**, de la Universidad de Bath (Reino Unido).

Este ingeniero fue, quien en **2005** inició el proyecto **RepRap** (*Replicating Rapid Prototyper*). El proyecto RepRap es una iniciativa para desarrollar máquinas de modelado por deposición fundida a partir de software y hardware libre (licencia GPL), destinadas al prototipado y manufactura rápida, y autorreplicables, es decir, que a partir de las piezas fabricadas con una de estas máquinas, puedan fabricarse, a su vez, más máquinas.

Adrian Bowyer denominó a la técnica aditiva empleada por estas máquinas con el nombre de **Fused Filament Fabrication (FFF)**, en una argucia legal para evitar emplear el nombre de **Fused Deposition Modeling (FDM)**, marca registrada por *Stratasys Inc.* No obstante, ambos nombres son generalmente empleados para referirse a la misma técnica.

### 1.5.1 Las primeras impresoras “FFF” Open-Source

Las cuatro primeras impresoras oficiales del proyecto RepRap fueron: “*Darwin*”, lanzada en Marzo de 2007; “*Mendel*”, lanzada en Octubre de 2009; “*Prusa Mendel*” y “*Huxley*”, lanzadas originalmente en 2010. Los principales desarrolladores del proyecto RepRap nombraron a cada máquina en honor a famosos biólogos evolucionistas ya que: “*la finalidad del proyecto RepRap es la replicación y la evolución*”. [17]



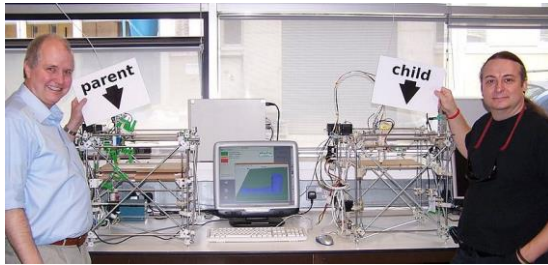


Ilustración 15. Primera Darwin y su descendiente [52]

Adrian Bowyer (izquierda) y Vik Olliver (derecha) con la primera máquina RepRap (parent), cuyas piezas plásticas están hechas con una máquina FDM comercial, y la primera máquina RepRap descendiente (child), cuyas piezas están hechas con la máquina progenitora. La impresora hija dio sus primeras piezas para otra descendiente el 29 de Mayo de 2008 en la Universidad de Bath, unas horas más tarde de ser montada.

Darwin (Ilustración 16) era una máquina bastante compleja, por lo que la comunidad de desarrolladores rápido dio con un modelo mejorado, Mendel (Ilustración 17), de la cual derivaron un gran número de modelos.

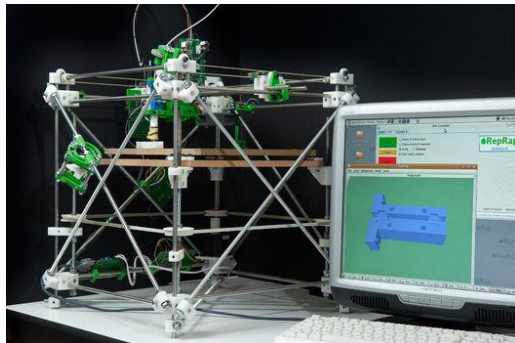


Ilustración 16. RepRap modelo Darwin [53]

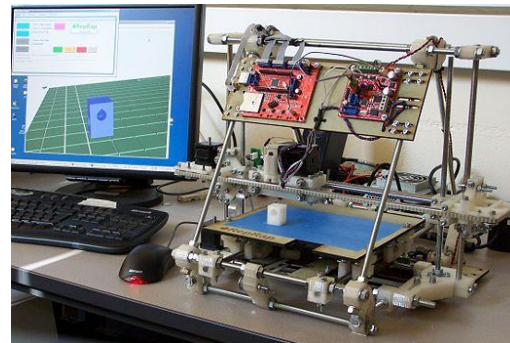


Ilustración 17. RepRap modelo Mendel [54]

### 1.5.2 Serie Prusa. La Prusa i3

**Josef Prusa**, de origen checo y uno de los principales desarrolladores dentro del proyecto RepRap, propuso en 2010 una mejora en el modelo Mendel, creando la máquina la que denominó Prusa Mendel (Ilustración 20).



Ilustración 20. Prusa Mendel [55]

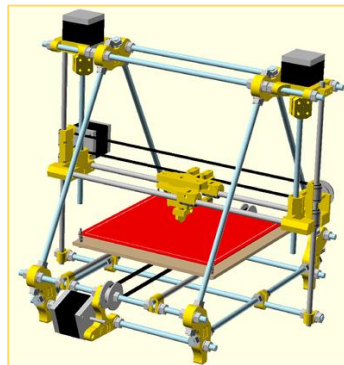


Ilustración 19. Prusa iteración 2 [18]

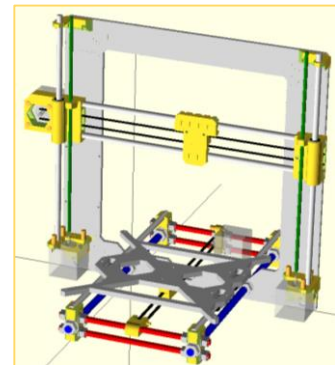


Ilustración 18. Prusa iteración 3 [56]

A partir de ahí, se fueron haciendo modificaciones, evolucionando y mejorando el modelo. La siguiente versión que sacó Prusa fue la *Prusa iteration 2* (Ilustración 19), pero la gran mejora llegó con la presentación de la *Prusa iteration 3* (Ilustración 18), más conocida como *Prusa i3*. Estos modelos han sido los más exitosos y los más reproducidos hasta la fecha alrededor del mundo. Por último, gracias a la libertad que otorga el *open-source*, entre estas iteraciones han surgido modelos intermedios y otras versiones. Cabe destacar el modelo *Air 2* [18], obra del

ingeniero español Manuel Palacios, conocido en el mundo RepRap por su pseudónimo *Mecano*, basándose en la *Prusa iteration 2*.

Tras esta introducción del movimiento RepRap, y de las primeras máquinas que surgieron paralelamente con este proyecto, hay que hacer especial hincapié en el modelo **Prusa i3**. **Este modelo de impresora es el que se ha empleado en este trabajo**. A su vez, el modelo Prusa i3 es el más exitoso y difundido actualmente. A partir del movimiento RepRap, han surgido numerosos grupos que difunden y enseñan a construir impresoras 3D open-source en Universidades, institutos o asociaciones. Desde hace aproximadamente un año, el modelo *Prusa i3* es el que lidera esta difusión por excelencia, por su sencillez de montaje y efectividad. De nuevo, hay diferentes modificaciones sobre este modelo. Cada una de estas versiones, está bajo un nombre diferente, pero todas ellas se pueden considerar “*Prusas i3*”.

En España, la introducción del movimiento RepRap está fuertemente ligado a la Universidad Carlos III de Madrid, dentro de la asociación de robótica “*Asrob*”. Por el año 2011, antiguos profesores como Juan González-Gómez o Alberto Valero, tras adquirir algunos de los primeros modelos de *Makerbot Industries*, impulsaron la replicación de máquinas entre alumnos y aficionados. Actualmente, estos ingenieros, y algunos antiguos alumnos, trabajan en el reciente departamento de robótica de la empresa española *Bq*, desarrollando, entre otros, impresoras 3D y productos de robótica educativa. Muy recientemente (julio de 2014), esta empresa ha lanzado al mercado, bajo licencia GPL, su propia modificación de la Prusa i3, a la que han denominado *Prusa i3 Hephestos*. Otros modelos que se destacarán de la Prusa i3, son la denominada *Prusa i3 Black Edition*, de la antigua *spin-off* de esta Universidad, *LeapTo3D*, o la *PowerCode*, otra modificación del apodado *Mecano*.



Ilustración 23. Hephestos de Bq [58]

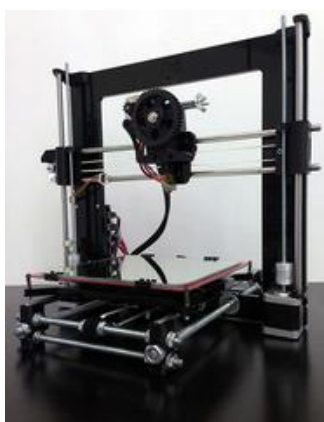


Ilustración 21. Black Edition de LeapTo3D [59]

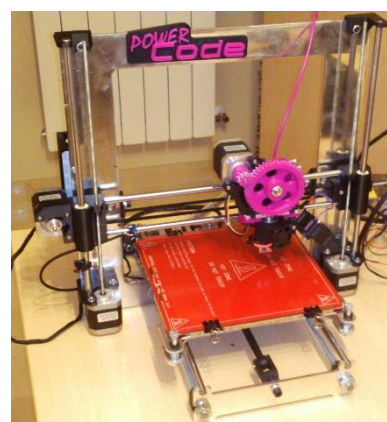
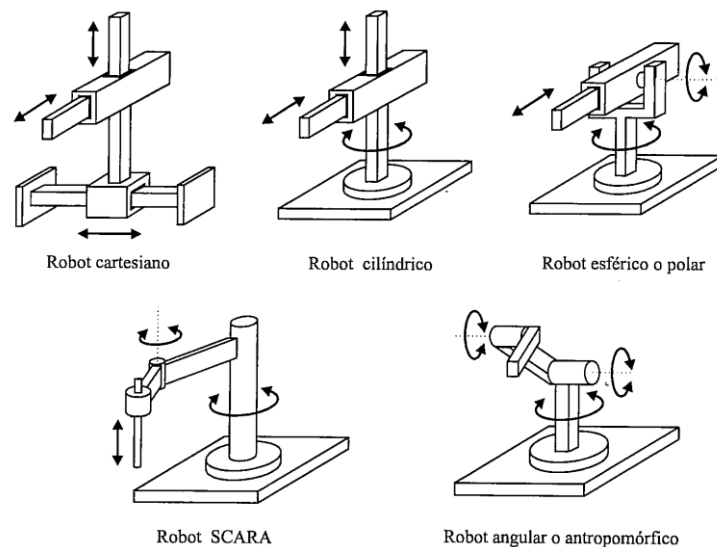


Ilustración 22. PowerCode de Mecano [60]

## 1.6 TIPOS DE IMPRESORAS FFF. CLASIFICACIÓN POR LA ESTRUCTURA MECÁNICA

Una impresora 3D FFF (o FDM) no es más que un sistema mecatrónico que consta de una parte mecánica con elementos fijos estructurales y otros elementos móviles actuados normalmente por motores paso a paso que se controlan mediante un sistema electrónico digital basado en microprocesador. La parte electrónica incluye también la alimentación y control de los elementos térmicos de la máquina (base de impresión y bloque calefactor), así como elementos de refrigeración (ventiladores) o de control e interfaz de usuario (botones y paneles LCD).

La estructura mecánica de la máquina debe permitir, como mínimo 3 GDL (grados de libertad), para que el movimiento del cabezal se pueda producir en el espacio y así poder crear una pieza con volumen. En la *Ilustración 24* se muestran las configuraciones mecánicas más usuales en robots industriales.

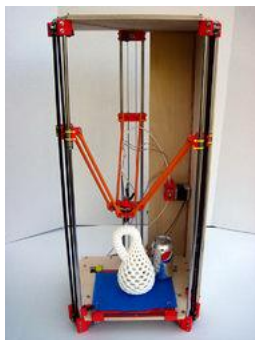


*Ilustración 24. Configuraciones más frecuentes en robots industriales [19]*

Las impresoras 3D más extendidas actualmente son las cartesianas, como la Prusa i3. Las máquinas esféricas o polares, y las angulares o antropomórficas son muy inusuales, el autor diría que inexistentes, al menos en el mundo RepRap, ya que la variación de la orientación de la boquilla de impresión es aún un campo por investigar.

Como ya se ha mencionado, la principal ventaja del *open-source* es que, cualquiera con la habilidad necesaria y el propósito de crear su propio modelo de máquina, puede hacerlo a partir de unos conceptos y herramientas base, análogas para todas ellas. Además, estas herramientas son modificables, y mejorables, según las necesidades de cada diseñador o usuario. Basta una pequeña búsqueda en la web para encontrar proyectos de impresoras tipo cilíndrico [20] o SCARA [21] en desarrollo.

Por último, son destacables modelos de impresora con otra mecánica diferente. Por un lado están los modelos **tipo delta** (muy rápidas), como la *Rostock* (*Ilustración 26*), y por otro las de **tipo prismático**, cartesianas, pero con una configuración específica, número inferior de actuadores y por ende reducción del coste de materiales, como la *Smartrap* (*Ilustración 25*).



*Ilustración 26. Modelo Rostock [50]*

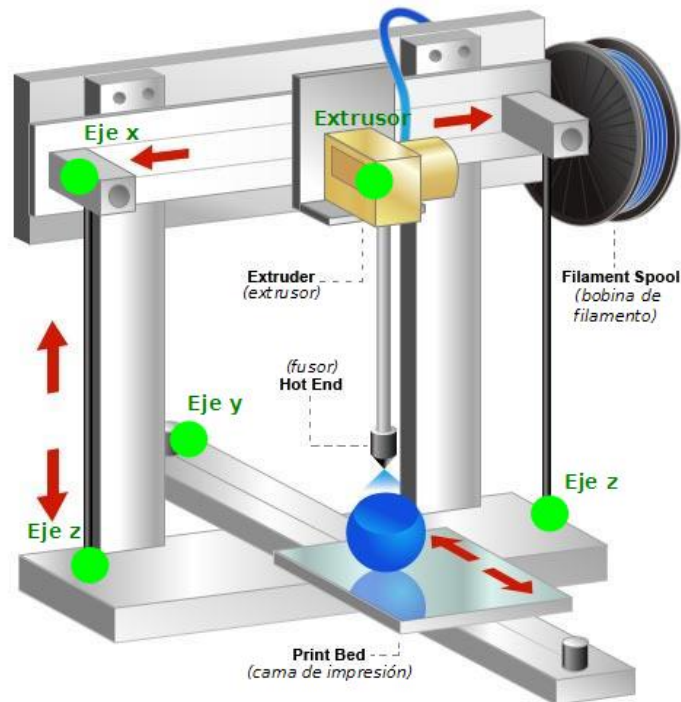


*Ilustración 25. Modelo Smartrap [51]*

## 1.7 PARTES MECÁNICAS DE UNA IMPRESORA 3D CARTESIANA

En el apartado 1.4.2 se describió el proceso de modelado por deposición fundida. Se introdujeron los principales elementos de estas máquinas. Veamos ahora estos elementos con algo más de detalle.

La *Ilustración 27*, tomada de [22] y con algunas anotaciones aclaratorias, es un buen esquemático de las partes de una impresora 3D FDM de tipo *Open-Source*. Además es un esquemático que se asemeja al modelo *Prusa i3* montado para realizar este trabajo, por lo que se podrá concebir de un modo más cómodo.



*Ilustración 27. Esquemático de una impresora 3D FDM tipo Prusa i3*

En el esquemático se aprecian claramente los elementos que aparecen en la descripción de Crump (*apartado 1.4.2*):

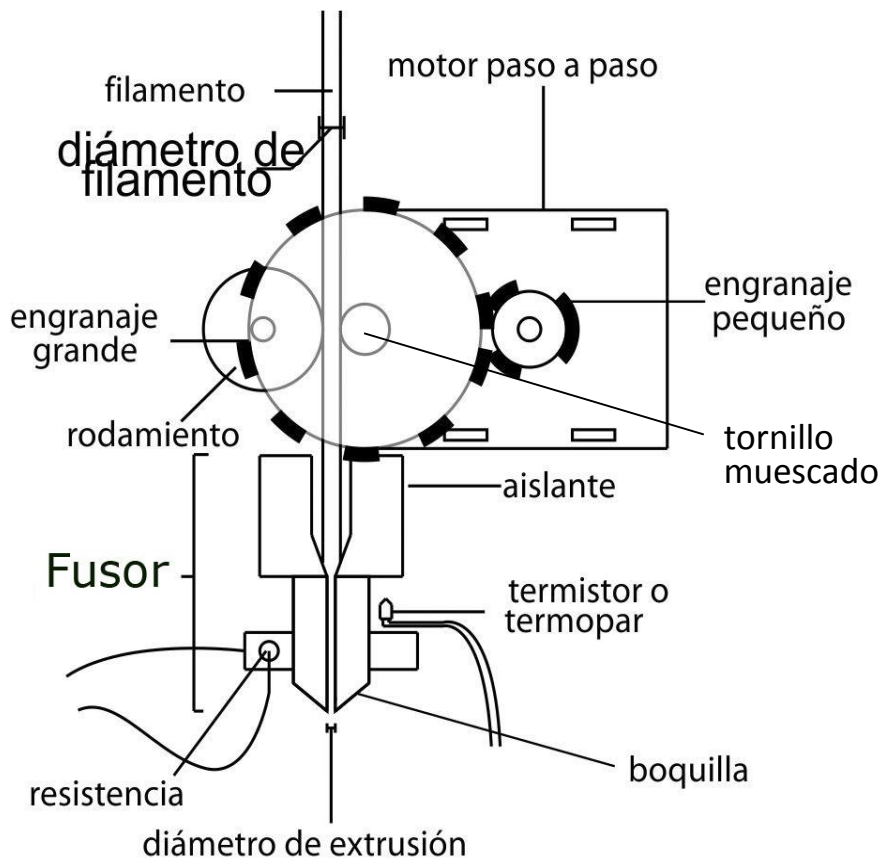
- **Cabezal móvil dispensador.** consta de dos partes diferenciadas que se explicarán con detalle posteriormente (extrusor + fusor) y separadas por una barrera térmica, exagerada en el dibujo.
- **Suministro de material.** En la máquina usada en este trabajo, y en la mayoría de las impresoras RepRap, el suministro de material se da en forma de filamento plástico, de diámetro 1.75 ó 3.00 mm.
- **Base,** o cama de impresión. Normalmente está calefactada.
- **Ejes “X”, “Y” y “Z”.** Son los que se muestran en el dibujo. Por convención, en las impresoras RepRap cartesianas, el carro del cabezal móvil se encuentra situado en el eje X, y la cama de impresión en el eje Y.
- **Actuadores.** En el mundo RepRap, están ampliamente extendidos los motores paso a paso *Nema 17*. Los motores se localizan en los círculos verdes del dibujo y se distribuyen de la siguiente manera: 1 para cada eje X e Y, 2 para el eje Z y 1 por extrusor.



### 1.7.1 El cabezal móvil

Una de las partes críticas de una impresora FDM es el cabezal dispensador de material, o cabezal de extrusión (*Ilustración 32*). La disparidad de modelos y configuraciones en esta parte de la impresora hace que la nomenclatura de sus elementos a veces se confunda o malinterprete. No obstante, el fundamento mecánico siempre es el mismo. El fundamento de la extrusión en la FDM difiere al proceso convencional de extrusión de polímeros, donde los pellets de material funden a lo largo de un cañón de extrusión, y la fuerza de empuje se produce mediante el giro controlado de un husillo. En este caso, la fusión de material se produce únicamente en el lugar inmediatamente anterior a la salida de material, y el filamento plástico en estado sólido genera la presión necesaria para controlar la salida de material.

En la *Ilustración 28* se representa un esquema del funcionamiento de este cabezal de extrusión.



*Ilustración 28. Partes del cabezal móvil de extrusión [23]*

El cabezal de extrusión se puede subdividir en dos partes:

#### 1) Conjunto motor paso a paso + reductor

Esta es la parte que “tira” de la bobina de material y “empuja” el filamento para que pase por la boquilla de extrusión. El engranaje pequeño de la reductora se sitúa en el eje del motor paso a paso y transmite el movimiento al engranaje grande. A su vez, el eje del grande es un tornillo con muescas, en inglés ***hobbed bolt*** (*Ilustración 31*), contra el cual se presiona el filamento mediante un rodamiento libre. La presión ejercida sobre el filamento se regula mediante dos tornillos con muelles. Las muescas del ***hobbed bolt*** quedan marcadas en el filamento y el desplazamiento del mismo se produce asemejándose a una transmisión cremallera-piñón.

## 2) Fusor o *hot-end*

El nombre más extendido para esta parte de la impresora es el término en inglés ***hot-end***, o punta caliente. Los *hot-ends* que se están imponiendo últimamente debido a su efectividad son los completamente metálicos, o *all-metal*, hechos de una pieza. A su vez, la mayoría de modelos de *hot-ends*, *all-metal* incluidos, suelen contener también el aislante, o barrera térmica, entre la parte caliente y fría del cabezal móvil. La barrera térmica en este tipo de *hot-end* es una serie de aletas para evacuar el calor. Esta barrera térmica está motivada por dos factores: 1) el cuerpo de la parte mecánica del cabezal móvil suele ser de piezas plásticas fabricadas por FDM, y hay que protegerlas de las altas temperaturas; 2) hay que mantener frío el canal por donde pasa el filamento para evitar la fusión en lugares indeseados y evitar atascos. Como medida adicional, mediante un ventilador se fuerza un flujo de aire alrededor de la barrera para aumentar la transferencia de calor.

Las otras partes del *hot-end* son: el bloque calefactor, donde se coloca una resistencia eléctrica que aporta la potencia en forma de calor, y un termistor para regular la temperatura; y la **boquilla** o **nozzle**, que es la punta con un agujero perforado por donde se fuerza a salir el material fundido.

Características técnicas del extrusor empleado		
Elemento	Modelo	Imagen
Extrusor (mecánica)	Greg's Wade Extruder v3 ( <i>modificado por LeapTo3D</i> )	Ilustración 30
Hot-end	E3D v5 <sup>1</sup>	Ilustración 29
Nozzle	E3D. Diámetro 0.4 mm	Ilustración 29

Tabla 4. Características técnicas del extrusor empleado



Ilustración 31. Hobbed bolt

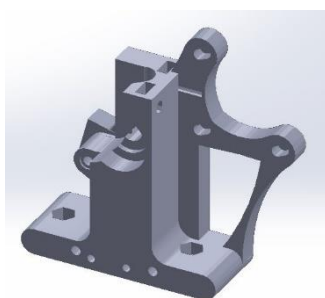


Ilustración 30. Cuerpo del extrusor

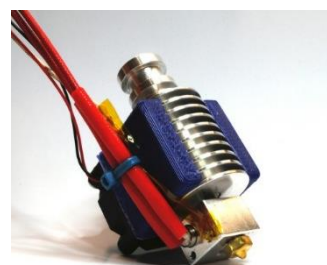


Ilustración 29. Hot-end E3D v5



Ilustración 32. Cabezal móvil montado

<sup>1</sup> <http://e3d-online.com/E3D-v5/v5-Full-Kit/E3D-V5-3mm-Direct-All-Metal-HotEnd>

## 1.8 MATERIALES Y APLICACIONES

### 1.8.1 Principales materiales empleados en el Modelado por Deposición Fundida

Los dos materiales más empleados en las impresoras FDM de tipo *open-source* son los polímeros termoplásticos **Poliacrilonitrilo butadieno estireno (ABS)** y **ácido poliláctico (PLA)**. El ABS comenzó siendo el más empleado. No obstante, por los motivos que se expondrán a continuación, el PLA se está imponiendo cada vez más. También, desde hace algún tiempo, se vienen empleando otros materiales plásticos como **policarbonato (PC)**, **Nylon**, o **filamentos elásticos** como el comercialmente denominado *Filaflex*.

El **ABS** es un termoplástico amorfo extraído del petróleo, está formado por bloques de acrilonitrilo, butadieno y estireno (ver *Ilustración 33*). Es el llamado plástico ingenieril, debido a que es un plástico cuya elaboración y procesamiento es más complejo que los plásticos comunes, como son las polioleofinas (polietileno, polipropileno). El ABS presenta unas buenas propiedades mecánicas (*Tabla 5*) que lo hacen adecuado para su uso en automoción y otras aplicaciones industriales, y también para otros usos domésticos. Sin ir más lejos, las piezas del famoso juego para niños, *Lego*, están hechas de este material. El ABS fue el primer material en usarse de manera extensiva en las impresoras RepRap.

Propiedades físico – mecánicas	
Alargamiento a la rotura (%)	45
Coeficiente de fricción	0,5
Módulo de tracción (GPa)	2,1 - 2,4
Resistencia a la tracción (MPa)	41 - 45
Resistencia al impacto Izod (J m <sup>-1</sup> )	200 - 400
Absorción de Agua – en 24 horas (%)	0,3 - 0,7
Densidad (g cm <sup>-3</sup> )	1,5
Resistencia a la radiación	Aceptable
Resistencia a los ultra-violetas	Mala

Tabla 5. Propiedades físico-mecánicas del ABS [24]

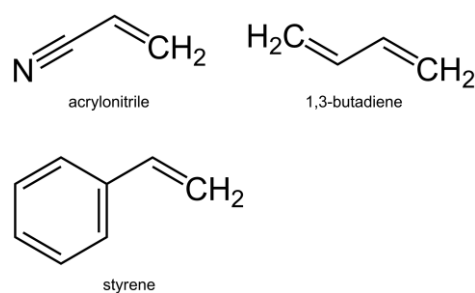


Ilustración 33. Componentes del ABS<sup>2</sup>

El **PLA** es un polímero constituido por moléculas de ácido láctico (ver *Ilustración 34*) y es actualmente el polímero biodegradable más popular en la industria. Los **polímeros biodegradables** se pueden dividir en dos categorías: **derivados del petróleo** y **derivados de componentes naturales**.

Los polímeros biodegradables derivados del petróleo, como por ejemplo el poli (alcohol vinílico) (PVOH), emplean etileno para producir acetato de vinilo para la polimerización de acetato de polivinilo, que más tarde se hidroliza para formar PVOH. El coste de producción de estos polímeros está estrechamente ligado al precio del crudo, y no es ecológico debido a la emisión de gases de efecto invernadero durante su producción.

Sin embargo, los polímeros biodegradables derivados de componentes naturales de plantas y animales, como los polisacáridos (almidón, celulosa, agarosa, quitosano,...) o algunas proteínas. Un ejemplo son los polímeros que utilizan la bio-actividad de bacterias para transformar productos de las plantas, como el almidón, en el producto desencadenante de la polimerización.

<sup>2</sup> [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/82/ABS\\_resin\\_formula.PNG/1280px-ABS\\_resin\\_formula.PNG](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/82/ABS_resin_formula.PNG/1280px-ABS_resin_formula.PNG)

El **ácido poliláctico** se produce de esta última manera. [25] Estos polímeros presentan, entre otras ventajas que se expondrán más adelante, que dado que provienen de compuestos derivados de la fijación natural de CO<sub>2</sub>, las emisiones netas de esta sustancia al ambiente cuando combustionan son cero. A parte, provienen de recursos virtualmente inagotables.

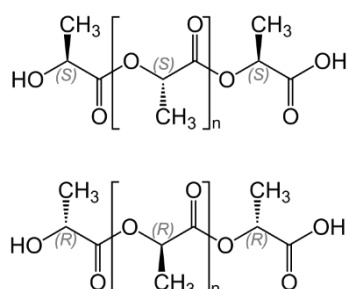


Ilustración 34. Unidad estructural del polímero PLA<sup>3</sup>

Actualmente, *NatureWorks* es el mayor productor del PLA para aplicaciones domésticas. De hecho, el filamento empleado para fabricar las muestras analizadas en este trabajo fue procesado a partir de la resina “PLA *NatureWorks*® *Ingeo 4032D*”, según informó *LeapTo3D*, antigua empresa donante del filamento. Aparte de su uso en la fabricación de este tipo de filamento, el polímero desarrollado por *NatureWorks* tiene las propiedades ideales para hacer láminas o para aplicaciones de empaquetado en la industria alimentaria. Esta resina proporciona una barrera a los olores y una alta resistencia a la grasa y los aceites. De la compañía productora de la resina podemos obtener algunas de las propiedades de la misma. [26]

Typical Material & Application Properties <sup>(1), (4), (3)</sup>			
Film Properties		Ingeo 4032D	ASTM Method
Density		1.24 g/cc	D1505
Tensile Strength	MD	15 kpsi	D882
	TD	21 kpsi	D882
Tensile Modulus	MD	500 kpsi	D882
	TD	550 kpsi	D882
Elongation at Break	MD	180%	D882
	TD	100%	D882
Elmendorf Tear	MD	17 g/mil	D1922
	TD	14 g/mil	D1922
Spencer Impact		2.5 joules	
Transmission Rates	Oxygen	675 cc-mil/m <sup>2</sup> -24hr-atm	D1434
	Carbon Dioxide	2,850 cc-mil/m <sup>2</sup> -24hr-atm	Internal
	Water Vapor	375 g-mil/m <sup>2</sup> -24hr-atm	F1249
Optical Characteristics	Haze	2.1%	D1003
	Gloss, 20°	90	D1003
Thermal Characteristics	Melting Point	155-170°C	D3418

(1) Typical properties; not to be construed as specifications.

(2) All properties measured on 1.0 mil film.

(3) Typical values for a film oriented 3.5x in MD and 5x in TD.

Tabla 6. Propiedades típicas del Ingeo™ Biopolymer 4032D de NatureWorks [27]

<sup>3</sup>[http://es.wikipedia.org/wiki/Polil%C3%A1ctido\\_%C3%A1ctico#mediaviewer/File:Polylactides\\_Formulae\\_V.1.svg](http://es.wikipedia.org/wiki/Polil%C3%A1ctido_%C3%A1ctico#mediaviewer/File:Polylactides_Formulae_V.1.svg)



### 1.8.2 Comparación de ABS y PLA en referencia a su uso en el FDM

A la hora de usar un filamento de ABS o PLA en una impresora RepRap, lo primero que debería tener en cuenta cualquier usuario es que ambos plásticos necesitan diferentes temperaturas de impresión, tanto para el extrusor, como para la base. Independientemente de si se usa ABS o PLA, estas temperaturas dependen de cada tipo de filamento en concreto, ya que variando ciertas propiedades de la cadena polimérica (como el peso molecular, la distribución de los diferentes monómeros en la cadena, etc.) o mediante la adicción de otras sustancias (como cargas, tintes, plastificantes, etc.), las propiedades y por tanto las condiciones de procesamiento de cada filamento pueden variar.

Debido a la naturaleza del proyecto RepRap, no hay una autoridad que regule y estandarice estrictamente las características técnicas de cada filamento, por lo que, dependiendo del material, color, y proveedor al que se compre el suministro de material, los parámetros térmicos idóneos para la impresión variarán. Será labor del usuario encontrar los valores adecuados, normalmente mediante ensayo y error. Hay que destacar que existen comunidades que buscan la estandarización de los diferentes filamentos, como por ejemplo la **UFIS (Universal Filament Identification System)**<sup>4</sup>, que busca la homogeneización de diámetros y tolerancias, tamaño de las bobinas y gama de colores, así como que cada proveedor provea todos los datos técnicos del filamento y las temperaturas óptimas de impresión en un código QR que pueda ser automáticamente transferido a las máquinas FDM para que se autoconfiguren los parámetros térmicos de impresión.

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, las temperaturas típicas para los termoplásticos ABS y el PLA se pueden aproximar a los siguientes valores. (Tabla 7)

	ABS	PLA
Extrusor (°C)	230	180
Cama de impresión (°C)	100	70

Tabla 7. Temperaturas típicas de impresión para ABS y PLA

Por otro lado, es posible imprimir el PLA sin calefactar la cama de impresión. No ocurre lo mismo con el ABS. Debido a que se contrae más al enfriarse, las piezas se deforman y se despegan de la cama, sobre todo en piezas con una base alargada. Este efecto se conoce como **warping**. La superficie de la cama de impresión es una superficie lisa y pulida, generalmente un cristal. Para favorecer la adhesión de las piezas mientras se imprimen, es necesario usar algún tipo de sustancia adherente, sobre todo si se imprime con la base en frío. Esta sustancia ha de ser: 1) suficientemente adherente para que la pieza quede fija durante todo el proceso, y 2) suficientemente poco adherente como para que la pieza se pueda despegar de la base una vez finalizada. Normalmente se emplean lacas o mezclas de cola o silicona líquida con agua.

Asimismo dada su diferente naturaleza y propiedades, tampoco son iguales los resultados tanto estéticos como en propiedades de las piezas modeladas con ABS que con PLA. En una web dedicada a la impresión 3D<sup>5</sup>, se encontró una buena comparativa entre la fabricación aditiva a partir de los dos diferentes materiales. A continuación se presenta esta comparativa (Tabla 8) traducida al español y con modificaciones que siguen el criterio del autor.

<sup>4</sup> <https://plus.google.com/communities/107859862288161234107>

<sup>5</sup> <http://www.absplastic.eu/pla-vs-abs-plastic-pros-cons/>

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>ABS</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Robusto y duro</li> <li>▪ Adecuado para partes de máquinas o autos</li> <li>▪ Punto de fusión más elevado</li> <li>▪ Vida útil más larga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Derivado del petróleo. No ecológico</li> <li>▪ Se deforma si no se imprime en una base caliente</li> <li>▪ Emite vapores nocivos al imprimir. Se necesita ventilación</li> <li>▪ Más difícil de imprimir</li> <li>▪ No apto para fabricar contenedores o embalajes alimenticios</li> </ul>
<b>PLA</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Se puede imprimir en base fría</li> <li>▪ Más ecológico</li> <li>▪ Apariencia más suave y brillante</li> <li>▪ No emite vapores nocivos al imprimir. Olor dulce al imprimir.</li> <li>▪ Permite velocidades de impresión más elevadas</li> <li>▪ Piezas resultantes con más detalle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Se puede deformar por el calor (temperatura de transición vítrea en torno a 60°C)</li> <li>▪ Menos robusto que el ABS</li> </ul>

Tabla 8. Comparativa entre ABS y PLA. Ventajas y desventajas.

El punto referente a la emisión de vapores nocivos es un tema importante al cual se le otorgó poca importancia en el inicio del desarrollo del movimiento RepRap. Se ha demostrado que la emisión de **partículas ultrafinas (UFPs – Ultra Fine Particles)** por las máquinas de escritorio de modelado por deposición fundida no es despreciable en un espacio de oficina estándar.

Las UFPs son particularmente relevantes desde una perspectiva médica ya que se depositan eficientemente en los pulmones y las vías respiratorias, provocando problemas cardiorrespiratorios y síntomas asmáticos, incluso a niveles mortales. Por lo tanto, se deben tomar precauciones al usar impresoras 3D dentro de interiores sin ventilar o sin filtrar debido a su alta emisión de UFPs.

Aunque las tasas de emisión tanto de impresoras que usan ABS como PLA se pueden calificar como altas, **las emisiones de las que emplean ABS se pueden considerar un orden de magnitud mayor frente a las que emplean el PLA** como material de suministro (*Ilustración 35*).  $\sim 1.9 \times 10^{11} \# \min^{-1}$  frente a  $\sim 2.0 \times 10^{10} \# \min^{-1}$ .

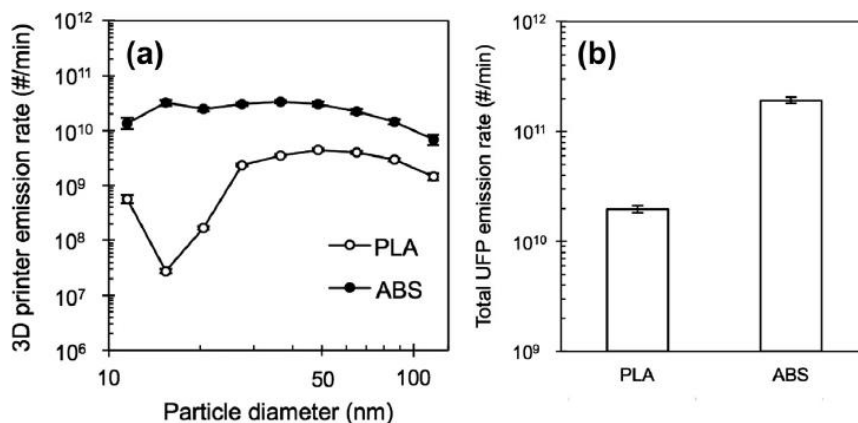


Ilustración 35. Ratios de emisión de UFPs en impresoras FDM de escritorio [28]

Aparte de la diferencia en los ratios de emisión observados entre el ABS y el PLA, hay también diferencias en la toxicidad debido a las diferencias en la composición química. La degradación térmica en productos hechos de ABS se ha demostrado tener efectos tóxicos. Por el contrario, el PLA es conocido por su biocompatibilidad. Nanopartículas de PLA se usan extensivamente en la administración de fármacos. [28] Es por esto por lo que muchos usuarios se decantan por el PLA ante el ABS, sobre todo cuando las máquinas van destinadas a colegios o institutos donde hay jóvenes, o si se trata de un usuario con hijos que va a instalar la máquina en su domicilio.

### 1.8.3 Aplicaciones relevantes del PLA

Como ya se ha mencionado, la **biocompatibilidad del PLA** lo hacen idóneo para **aplicaciones de bioingeniería**. La unión de esta biocompatibilidad y la posibilidad de crear objetos de libre forma mediante la FDM crean un campo con un extenso potencial por explorar, en el que ya se están consiguiendo los primeros logros.

Puesto que el PLA puede ser asimilado por el cuerpo humano, se han encontrado importantes aplicaciones en la administración de fármacos por liberación sostenida. Sus propiedades mecánicas y absorbabilidad hacen del polímero PLA un candidato ideal para implantes en huesos o tejidos blandos (traumatología facial, cirugía ortopédica, oftalmología, ortodoncia, implantes locales para la liberación controlada de fármacos anti-cáncer), y para suturas reabsorbibles (cirugía ocular, cirugía del pecho y abdomen). Las características mecánicas, farmacéuticas y de bioabsorción dependen de parámetros controlables como la composición química y el peso molecular del polímero. El margen de tiempo para la reabsorción del polímero puede ser tan corto como unas semanas hasta unos pocos años y se puede regular mediante el uso de diferentes formulaciones y la adición de radicales en sus cadenas. [29]

Por otro lado, la mayor parte del PLA producido mundialmente se hace para aplicaciones domésticas, tales como: indumentaria, botellas, vasos, embalajes para alimentos. Todos estos productos de PLA están orientados a sustituir a los existentes polímeros petroquímicos, con la ventaja de que los productos de PLA tienen una producción respetuosa con el medio ambiente y son biodegradables tras su desecho.

Para cerrar este apartado, el PLA existe desde hace décadas, pero sus aplicaciones se han expandido rápidamente en los años más recientes. El PLA es un polímero biodegradable que posee el potencial para sustituir a los existentes polímeros derivados del petróleo, y así ayudar a superar la acumulación de residuos plásticos en los vertederos. Además de su uso en productos generales y de embalaje, tiene también aplicaciones biomédicas en cirugía, debido a su compatibilidad con tejidos vivos. El PLA es favorable ya que puede ser producido en masa a partir de productos agrícolas, que son renovables, permitiendo a la sociedad reducir su dependencia de productos petroquímicos. La investigación y desarrollo continuo ha hecho posible reducir las emisiones a la atmósfera asociadas con su producción. En conclusión, el PLA tiene un gran potencial y mercado como polímero biodegradable para un futuro sostenible. [25]

## 1.9 PARÁMETROS DE IMPRESIÓN RELEVANTES EN LA FDM

Como ya se introdujo en el apartado 1.8.2, cada tipo de filamento requiere de unas temperaturas de impresión diferentes, así como de una adherencia adecuada a la base de impresión. Estos son algunos de los parámetros de impresión que un usuario de una impresora FDM debe fijar antes de mandar imprimir alguna pieza. Asimismo, cuando se trata de una impresora *open-source*, el constructor de la misma debe cuidarse de otorgar a la máquina la controlabilidad y precisión adecuada para que estos parámetros se puedan fijar con una estabilidad aceptable durante todo el tiempo de impresión.

Los parámetros de impresión están fuertemente ligados a las propiedades finales de la pieza impresa y determinarán propiedades como su resistencia mecánica, tolerancia dimensional, acabado superficial, densidad y masa total de la pieza. Como se detallará más adelante, en este trabajo se pretenderá obtener una relación entre algunos de estos parámetros con las propiedades finales de la pieza.

Algunos de los parámetros más relevantes son:

### 1. Velocidad de impresión

La velocidad de impresión es la velocidad a la cual se mueve la boquilla de extrusión mientras deposita el filamento durante el moldeo de la pieza. Conceptualmente, equivale a la velocidad de avance en una operación de fresado. Lo más evidente que se puede relacionar con este parámetro es el tiempo total en el que se fabricará la pieza, que, a su vez, depende de algunos otros parámetros.

La velocidad de impresión también determina el tiempo que tiene la última capa para solidificar. Una velocidad de impresión baja dará más tiempo a la última capa impresa antes de que se deposite sobre la misma la consecutiva. Por esto se sospecha que la velocidad de impresión puede jugar un factor determinante en la efectividad de pegado entre capas y será un aspecto que se estudiará y se discutirá en este trabajo.

Por otro lado, una velocidad de impresión demasiado alta generará unas vibraciones en la máquina que repercutirá en la precisión dimensional de la pieza, y que puede llegar a estropear la propia máquina si no es lo suficientemente robusta, algo que suele pasar en el *open-source*, sobre todo al emplear materiales de bajo coste.

### 2. Temperatura de la base de impresión

El plástico semifundido se deposita sobre una base lisa y pulida (cristal) donde se va moldeando la pieza deseada. Esta base debe estar recubierta de un material que sirva de adherente para que la pieza no se despegue durante la impresión. Como adherente se usan, entre otros: cinta *Kapton*, lacas, disoluciones de agua y cola blanca o disoluciones de agua y silicona líquida transparente.

En la mayor parte de modelos de impresoras 3D, esta base de impresión se puede calentar mediante resistencias eléctricas. Mantener la base caliente durante la impresión es conveniente para prevenir el denominado *warping*, o el levantamiento o deformación de las piezas en ciertas zonas durante la impresión. El *warping* se da con mayor frecuencia en piezas con una superficie de contacto con la base muy alargada (como las muestras que se

fabricaron para el presente trabajo) y más en ABS que en PLA, siendo prescindible el uso de la base caliente al imprimir en PLA y casi imprescindible al hacerlo con ABS.

### 3. Temperatura del extrusor

En el apartado 1.7.1 se detallaron las partes del extrusor. La temperatura del fusor tiene que ser la adecuada para el filamento concreto empleado. Actualmente, este es uno de los problemas existentes a la hora de hacer llegar la impresión 3D a un público inexperto, ya que el filamento se vende sin unos valores indicados y es labor del usuario encontrar esta temperatura.

Una temperatura de impresión demasiado baja provocará que el plástico no fluya adecuadamente y se producirán atascos en el extrusor. Una temperatura muy alta puede provocar que el plástico se degrade y pierda propiedades tanto estructurales o funcionales como estéticas, pudiéndose producir un oscurecimiento del color, realizándose la impresión de manera no satisfactoria.

### 4. Relleno

Las piezas impresas mediante FDM no suelen ser macizas. Un relleno al 100% supone mayor tiempo de impresión y mayor consumo de plástico. En piezas destinadas al prototipado rápido, piezas con las que un diseñador sólo quiere hacerse una idea tangible de cómo serán sus diseños, los requerimientos mecánicos de la pieza no son tales como para necesitar un relleno totalmente sólido y se suele optar por el ahorro de tiempo y material. Mediante el software de laminado del que se habló en el apartado 1.4.1, el usuario puede determinar en qué porcentaje rellenar su pieza, así como el patrón de relleno que se siga en la misma.

Esto determinará la masa y densidad de la pieza, así como su robustez. Los patrones de relleno más usados suelen ser el rectilíneo (usado en este trabajo) o el de panal de abeja, aunque existen otros como el concéntrico o algunos basados en el uso de curvas, pero su uso es muy poco frecuente.

La Ilustración 36<sup>6</sup> muestra algunos patrones de relleno con diferentes porcentajes. Por último hay que añadir que en la parte inferior y superior de la pieza siempre se imprimen una o varias capas totalmente sólidas para otorgar a la misma de una base y una parte superior cerradas.



*Ilustración 36. Tipos de relleno empleados en el FDM*

---

<sup>6</sup> <http://st3p3d.com/blogs/3d-printing/14992261-a-few-ways-to-strengthen-3d-printed-parts>

## 5. Número de perímetros

El método de impresión que generalmente se sigue al crear una nueva capa es, primero definir los perímetros de la pieza, y después aplicar el relleno. El número de perímetros es un parámetro que se puede definir y del que dependerá la robustez y superficie de la pieza.

## 6. Altura de capa

Llanamente, podemos definir la altura de capa como la distancia que sube el eje Z (donde está situado el extrusor) entre capa y capa. La altura de capa determina la separación existente entre las mismas, y por lo tanto, la compresión física que existe entre ellas. Es por ello que este factor podría afectar, entre otras cosas, al grado de adhesión entre las capas. Por otro lado, la altura de capa, al intervenir en el número de capas necesarias para construir una pieza, también influirá en el tiempo de impresión; a menor altura, más tiempo.

La altura de capa está muy relacionada a la apariencia superficial que presentan las piezas, sobre todo si se tratan de piezas curvas o con una geometría intrincada. Si la cara de la pieza es plana y perpendicular o paralela al plano de impresión, la altura de capa no es tan relevante, ya que las capas que se verán en la pieza final serán más o menos finas, pero la apariencia será fiel a lo que se pretendía conseguir.

No obstante, si la superficie es curva o no es ortogonal al plano de impresión, la altura de capa determinará la aproximación que logremos a la superficie real de la pieza. Como se puede observar en la Ilustración 37<sup>7</sup>, la línea naranja representa la pieza que se quería construir, y los rectángulos azules las diferentes capas reales que se han impreso.

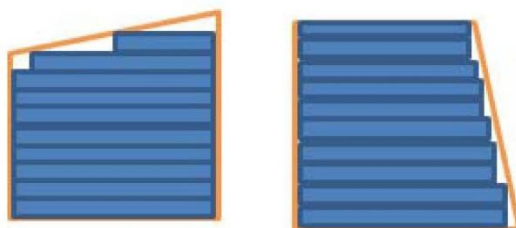


Ilustración 37. Relación entre la altura de capa, orientación de las caras y apariencia final.

Como analogía, esto nos recuerda a la interpretación geométrica de la integral de Riemann. Aunque, en la Ilustración 38<sup>8</sup>, las capas estarían giradas 90°, la idea es clara: al aumentar el número de rectángulos (menor altura de capa), se obtiene una mejor aproximación.

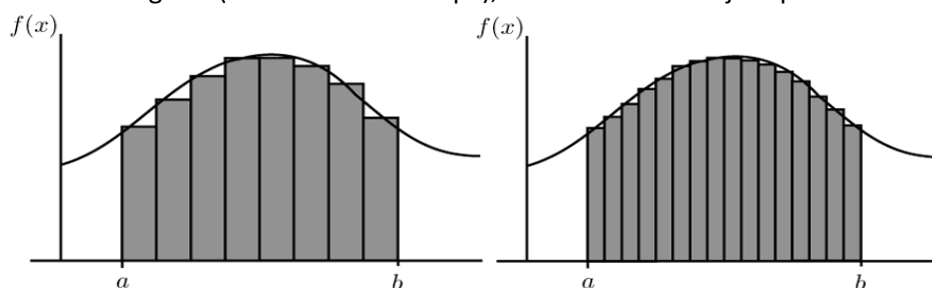


Ilustración 38. Interpretación geométrica de la integral de Riemann

<sup>7</sup> <http://www.redeyeondemand.com/redeye-technology-insights/3d-printing-cost/>

<sup>8</sup> [http://es.wikipedia.org/wiki/Integraci%C3%B3n\\_de\\_Riemann](http://es.wikipedia.org/wiki/Integraci%C3%B3n_de_Riemann)

Disminuir la altura de capa es complicado a partir de ciertos valores, ya que se requiere un diámetro del *nozzle* cada vez más pequeño, y una precisión en la máquina difícil de conseguir con materiales *low-cost*.

Como ejemplo, actualmente en la *Bq Witbox*, una impresora derivada del *open-source*, pero construida en fábrica de un modo profesional y un presupuesto algo holgado, los valores recomendados de altura de capa para diferentes resoluciones son los que se muestran en la Tabla 9.

Resolución	Altura de capa
Baja	300 micras
Media	200 micras
Alta	50 micras

Tabla 9. Relación de resolución y altura de capa en la impresora Witbox de Bq

Un problema que se ha encontrado especialmente tedioso a la hora de controlar la máquina, ha sido la distancia inicial que separa el *nozzle* de la cama de impresión. La cama de impresión se atornilla a una base acoplada con rodamientos lineales al eje Y de la máquina. En esos tornillos se insertan unos muelles que sirven precisamente para poder regular la distancia y la perpendicularidad de la cama al *nozzle* en todo su alcance sobre el plano XY. El problema principal son los desajustes constantes de esta distancia, que hay que regular tras un cierto número de impresiones, y que provocan efectos como:

- *Si el nozzle está muy distante.* Las primeras capas no se adhieren bien a la cama y la pieza se despeg.
- *Si el nozzle está tocando la cama de impresión.* Se producen aglomeraciones de plástico y surcos en las primeras capas que repercuten en las inmediatamente posteriores y en la apariencia final de la pieza. O incluso, se pueden producir atascos de plástico ya que la salida de material está obstruida.

En la Ilustración 39, obtenida de un vídeo explicativo en el canal de Youtube de Bq<sup>9</sup>, se aprecia claramente este problema, y se indica la distancia adecuada del *nozzle* con la cama.

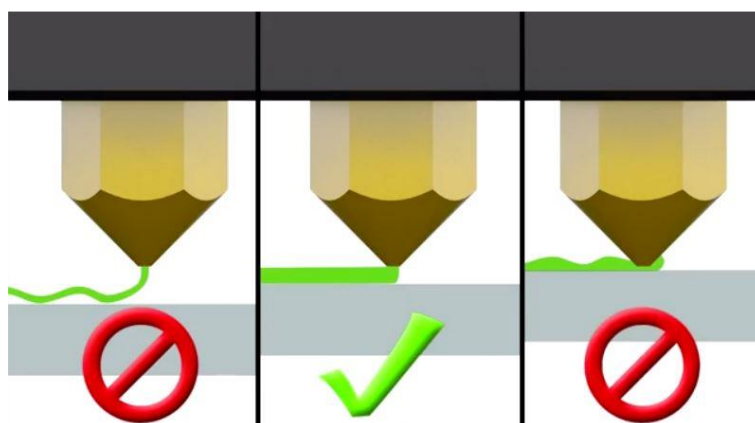


Ilustración 39. Esquemático sobre la distancia adecuada de separación entre el nozzle y la cama de impresión

<sup>9</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=h3WZbTiTS38>

## **7. Diámetro de la boquilla**

El diámetro de la boquilla o *nozzle* establece el diámetro del material de deposición semifundido. Boquillas más gruesas darán como resultado menores tiempo de impresión y menos resolución superficial, y viceversa. El diámetro más extendido actualmente en las impresoras *RepRap* es de 0.4 mm, que proporciona un compromiso entre velocidad de impresión y acabado.

## **8. Uso de ventilador de capa**

El ventilador de capa se coloca sobre el carro de extrusión de la máquina. Suele estar acoplado a una tobera que incrementa la velocidad y orienta el flujo de aire hacia la zona que rodea el orificio de salida del plástico semifundido, esto es, la última capa de material depositado. Esto ayuda a que la última capa de material solidifique más rápido. Como se discutirá más adelante, el uso de ventilador de capa conllevará sus pros y sus contras.

En la impresora empleada para la fabricación de las muestras, se empleó un ventilador de capa de 40x40mm y 12V acoplado a una tobera impresa en ABS, cuyo diseño se descargó de la web *Thingiverse.com* [30].



## 2 MOTIVACIÓN Y PLANTEAMIENTO DE OBJETIVOS

---

Tras una revisión del estado del arte sobre las tecnologías de manufactura aditiva, y especialmente sobre el modelado por deposición fundida, queda patente, por el gran número de publicaciones y trabajos científicos, que esta tecnología está en auge, debido a la enorme libertad que permite en el diseño de componentes y la reducción de costes asociados a su proceso de desarrollo y producción. Sin embargo y pese a que en las últimas décadas se ha experimentado un gran desarrollo en esta tecnología, aún quedan aspectos relevantes que pueden ser estudiados y mejorados no sólo para obtener una mejor comprensión de las relaciones entre los parámetros de procesado y las propiedades de las piezas fabricadas, sino también para mejorar la calidad y las prestaciones de las mismas o encontrar nuevos campos de aplicación.

Así mismo, el empleo de materiales ecológicos que permitan una reducción de la energía necesaria para su procesado, sean reciclables y biodegradables (en el caso de que finalmente sean desechados) y no sean dañinos para la salud humana y la del medio ambiente, supone un reto en la sociedad moderna.

Es por ello que una de las principales motivaciones para el emprendimiento de este trabajo haya sido el potencial uso que se le puede dar al ácido poliláctico (PLA), procesado mediante modelado por deposición fundida. Sus propiedades medioambientales y de biocompatibilidad, ligadas a la creciente expansión de la impresión 3D de tipo FDM, forman una pareja de la cual ya se están obteniendo los primeros beneficios, pero sobre todo, de la cual se espera una serie de avances tecnológicos que hagan mejorar la calidad de vida.

Se han encontrado múltiples estudios sobre síntesis y producción del PLA a partir de sustancias vegetales, así como de sus beneficios y su potencial uso en aplicaciones biomédicas. No obstante, la existencia de estudios sobre su procesado mediante modelado por deposición fundida en el ámbito de la ingeniería biomédica no es muy elevada, pero sí es un tema actual en auge sobre el cual aparecen estudios de manera frecuente. Asimismo, tampoco abunda la existencia de información científica sobre los parámetros a fijar a la hora de realizar una impresión con PLA mediante FDM en una impresora *RepRap*, y las repercusiones que tendrá en la pieza final la selección de los diferentes valores en estos parámetros.

Es cierto que se han encontrado estudios similares para otros materiales diferentes al PLA [31], o para la factibilidad del uso del PLA en el modelado por deposición fundida [32]. Como muestra de lo novedoso del problema planteado, cabe resaltar que una vez propuesto el presente trabajo y comenzado el proceso experimental, se encontró un estudio similar que abrió nuevos puntos de vista [33].

Tras la percepción de los problemas encontrados a la hora de usar máquinas *RepRap* y el estudio del panorama actual del PLA y el modelado por deposición fundida, viendo sus potenciales aplicaciones, y la escasez de estudios estrechamente relacionados, se formuló un planteamiento de objetivos.

*El objetivo principal de este trabajo ha sido establecer una relación entre las propiedades finales de una pieza de PLA modelada mediante FDM en una impresora RepRap en base a ciertos parámetros de impresión.*

Para ello se procedió a adquirir los materiales necesarios y a fabricar y configurar para su uso una impresora de tipo *RepRap* de uso común (Prusa i3) en la que se pudiera usar un filamento de PLA. Una vez realizado el montaje, se planteó un diseño factorial de experimentos en el que se identificaron las variables que pueden afectar a las propiedades de la pieza (los parámetros de impresión) y se seleccionaron los que se consideraron más relevantes, para crear un diseño con cuatro factores a evaluar.

Tras la elección del diseño y la fabricación de las muestras se midieron las dimensiones, densidades y las propiedades mecánicas de todas ellas mediante ensayos a tracción para intentar encontrar las variables que más afectan a estas propiedades e intentar llegar a un óptimo en base a la propiedad que deseemos mejorar.

Tras estos experimentos se realizó una búsqueda de causas, analizando las características de la superficie de fractura, primero con el microscopio estereoscópico en todas las muestras, y a continuación mediante el microscopio electrónico de barrido en las que se consideraron más relevantes. Además se llevaron a cabo análisis térmicos para determinar propiedades térmicas de los materiales utilizados y su posible degradación.

Con toda esta información, se propondrá una interpretación de los resultados que permita sacar las conclusiones pertinentes del estudio para que otros usuarios puedan sacar provecho de las mismas y el proceso se vaya mejorando manteniendo así la filosofía de desarrollo del proyecto *RepRap*.

### 3 PROCESO EXPERIMENTAL

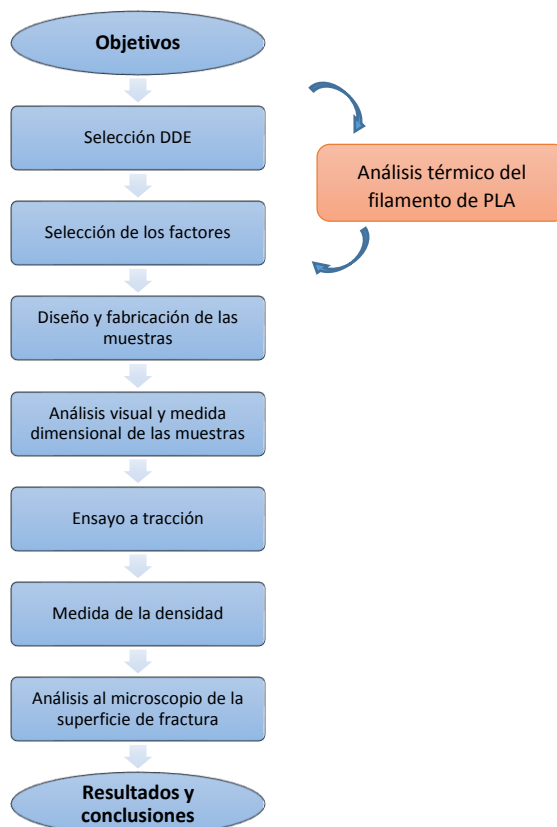


Ilustración 40. Proceso experimental

El proceso experimental seguido se representa en la *Ilustración 40*. Los primeros pasos hasta los ensayos a tracción tuvieron inevitablemente que seguir el orden representado. Una vez se tuvieron las probetas destruidas tras ser traccionadas, se seccionaron muestras con una segueta para proceder a realizar el resto de análisis. Los análisis térmicos se hicieron previamente a la selección del dominio experimental de las temperaturas.

#### 3.1 MATERIALES

Para fabricar las muestras analizadas en este trabajo se empleó una bobina de filamento de PLA natural de 3.0 mm, donada por la antigua *spin-off* de esta Universidad (UC3M) *LeapTo3D*. Según se informó, el filamento está fabricado con “PLA NatureWorks® Ingeo 4032D”, cuyas propiedades más destacables se pueden observar en la Tabla 6 y su ficha técnica completa se puede encontrar en [27].



Ilustración 41. Bobina de PLA Natural 3.00 mm empleada

## 3.2 EQUIPOS Y METODOLOGÍAS

### 3.2.1 Diseño factorial completo

Como ya se ha introducido, en el presente estudio se pretende establecer una relación entre los parámetros de impresión fijados en una impresora *RepRap* de modelado por deposición fundida y las propiedades finales de una pieza fabricada con la misma en ácido poliláctico (PLA).

Para llevar a cabo este objetivo principal, el primer problema a abordar fue cómo analizar el efecto conjunto de estos diferentes parámetros en la pieza final. Tras un análisis de los **diseños de experimentos** (DDE) existentes, se creyó conveniente llevar a cabo un diseño factorial de experimentos, ya que este tipo de diseño se usa ampliamente en casos donde intervienen varios factores y se quiere estudiar el efecto conjunto de los mismos sobre una determinada respuesta. [34]

Cuando el objetivo es medir cómo influyen  $k$  factores en un proceso y descubrir si interaccionan entre ellos, el **diseño factorial completo  $2^k$**  es la estrategia experimental óptima. Este diseño permite explorar una zona escogida del dominio experimental y encontrar una dirección prometedora para la optimización posterior. [35]

La siguiente cuestión fue elegir qué parámetros de impresión se escogerían como factores del experimento. Tras evaluar la importancia de los diferentes parámetros, y otros aspectos técnicos de la máquina empleada, se decidió elegir un total de **4 factores**, lo que da lugar a un número de  $2^4 = 16$  **diferentes combinaciones**, y la fabricación de **3 muestras por combinación** para lograr algo de repetibilidad en las medidas, por lo que el número total de muestras a fabricar fue de **48**.

Pese a que se podría plantear un diseño factorial fraccionado  $2^{k-p}$ , para reducir el número de experimentos se planteó el diseño completo, ya que el número de ensayos requeridos era factible, tanto en tiempo como en costes.

Finalmente, los cuatro factores elegidos (*ver definición en apartado 1.9*) fueron:

- A. **Uso del ventilador de capa**
- B. **Velocidad de impresión**
- C. **Temperatura de la cama de impresión**
- D. **Temperatura del extrusor**

#### 3.2.1.1 Justificación de la selección de factores

Las dos temperaturas se escogieron ya que su correcta selección es uno de los problemas más comunes entre los usuarios de impresoras *RepRap*.

Se seleccionó la temperatura de extrusor como factor ya se quería evaluar si es mejor imprimir el PLA con la temperatura mínima necesaria para que extruda, o una temperatura algo más elevada. La temperatura mínima se obtuvo mediante ensayos previos.

Por otro lado, cada vez salen más modelos de impresoras pensadas sólo para imprimir en PLA, y con la base de impresión sin la posibilidad de ser calentada. Esto trae ventajas como un menor consumo energético, y mayor seguridad frente a usuarios susceptibles de sufrir lesiones o quemaduras, como los niños. No obstante, no se encontró conocimiento sobre si era mejor

imprimir el PLA con la base fría (a temperatura ambiente) o caliente (cercana a su temperatura de transición vítrea).

Parámetros como el relleno o el número de perímetros fueron descartados a la hora de ser elegidos como factores experimentales. En otro estudio llevado a cabo en esta Universidad [26], se vio como el incremento en la densidad de relleno se reflejaba en un aumento en la resistencia a tracción. Por esto, se decidió fabricar las piezas macizas, esto es, con un relleno al 100% y un número de perímetros fijo y común a todas las muestras. De esta manera, el cálculo de la tensión de rotura sería más fiable, al conocer con seguridad la sección de la muestra (considerándola maciza).

La altura de capa se fijó en **200 micras** para todas las muestras y el diámetro de la boquilla también se estableció como constante, en **0.4 mm**, ya que es el más extendido entre la comunidad de usuarios. Por otro lado, otro motivo por el cual se estableció usar únicamente la boquilla de diámetro 0.4 mm fue para evitar desajustes en la máquina y errores humanos a la hora de realizar su cambio. Se decidió no variar la altura de capa debido a la relación que tiene con el diámetro de la boquilla, y el difícil control de la separación inicial del *nozzle* con la cama de impresión, problema que se describió en el apartado 1.9.

La relación “200 micras – 0.4 mm” daba buenos resultados de impresión, sumado a la restricción en la selección del número de factores para no elevar desproporcionadamente el número de experimentos, resultó en la fijación de estos parámetros como constantes.

En cuanto a la velocidad de impresión, era un parámetro que no podía dejar de incluirse como factor, ya que repercute directamente en el tiempo total de impresión de una pieza. Se puede afirmar que para todo usuario, es un valor añadido tener sus impresiones en el menor tiempo posible, siempre sin olvidar la calidad final de la pieza impresa, por lo que la relación entre estos dos valores era una cuestión de obligado análisis.

Por otro lado, como ya se ha comentado, al variar la velocidad de impresión, varía el tiempo que hay de enfriamiento entre capa y capa, lo que puede dar lugar a repercusiones en el pegado de las capas. Algo similar ocurre con el uso del ventilador de capa, porque aunque no varía este tiempo, sí que varía la velocidad de enfriamiento de la última capa, y por ende, el grado de adhesión entre las mismas, y la consistencia y apariencia final de la pieza. Es por esto que se decidió incluir este último parámetro como cuarto factor experimental.

Los factores finalmente seleccionados y su dominio experimental se muestran en la *Tabla 10*.

Factores	Dominio experimental	
	Nivel (-)	Nivel (+)
<i>Ventilador de capa (%)</i>	0	100
<i>Velocidad de impresión (mm/s)</i>	30	60
<i>Temperatura de la cama (°C)</i>	24,2	70
<i>Temperatura del extrusor (°C)</i>	195	215

*Tabla 10. Factores y dominio experimental*

### 3.2.1.2 Matriz de experimentos y plan de experimentación

Para cada factor se eligen dos valores máximo y mínimo que puede tomar, y se asigna la notación codificada -1 al nivel inferior y +1 al superior (- y + para simplificar). Para conocer el efecto de un factor, es suficiente con hacerlo variar entre dos valores. Los más adecuados son los extremos

de su dominio experimental: entre el nivel -1 y el +1. Y además esta variación se debe realizar para cada posible combinación de los valores de los demás factores. Esto permitirá descubrir si el efecto depende de qué valor tomen los otros factores. [35]

Matriz de experimentos						Plan de experimentación				
N° experimento	HEX	Ventilador	Velocidad	Hot-bed Temp	Hot-end Temp	Ventilador (%)	Velocidad (mm/s)	Hot-bed Temp (°C)	Hot-end Temp (°C)	
#1	0	-	-	-	-	0	30	24,2	195	
#2	1	+	-	-	-	100	30	24,2	195	
#3	2	-	+	-	-	0	60	24,2	195	
#4	3	+	+	-	-	100	60	24,2	195	
#5	4	-	-	+	-	0	30	70	195	
#6	5	+	-	+	-	100	30	70	195	
#7	6	-	+	+	-	0	60	70	195	
#8	7	+	+	+	-	100	60	70	195	
#9	8	-	-	-	+	0	30	24,2	215	
#10	9	+	-	-	+	100	30	24,2	215	
#11	A	-	+	-	+	0	60	24,2	215	
#12	B	+	+	-	+	100	60	24,2	215	
#13	C	-	-	+	+	0	30	70	215	
#14	D	+	-	+	+	100	30	70	215	
#15	E	-	+	+	+	0	60	70	215	
#16	F	+	+	+	+	100	60	70	215	

Tabla 11. Matriz de experimentos y plan de experimentación

Con esto, se realizan todas las combinaciones posibles y se crea una *matriz de experimentos* con las mismas combinaciones que en una tabla de verdad binaria, en total 16 combinaciones (Tabla 11). Aprovechando este hecho, se asignó a cada combinación un símbolo hexadecimal simplemente para facilitar el trabajo a la hora de enumerar y clasificar todas las muestras.

El *plan de experimentación* se obtiene al reemplazar los valores – y + por los valores de las variables reales. Las dieciséis respuestas respectivas a cada combinación se pueden combinar para obtener diferentes informaciones: *valor medio*, *efectos principales* y *efectos de interacción entre los factores*.

Estos efectos se calculan haciendo uso de la llamada *matriz de los efectos*. En el presente trabajo, los cálculos se realizaron con ayuda del programa informático “**STATGRAPHICS Centurion XVI**”.

Para ilustrar el procedimiento de cálculo de un modo más cómodo, se propone a continuación un **ejemplo** con tres factores a dos niveles en lugar de cuatro.

Llámense los factores *A*, *B* y *C*, el número de experimentos que habría que realizar en este caso para ejecutar un diseño factorial completo sería de  $2^3 = 8$ . Las ocho respuestas (designadas por  $y_i$ ,  $i = 1...8$ ) medidas en cada experimento se pueden combinar para obtener ocho informaciones

(tantas como experimentos): el valor medio, tres efectos principales, tres efectos de interacción de dos factores y un efecto de interacción de tres factores. (Tabla 12)

Análogamente, en el experimento de cuatro factores llevado a cabo, las informaciones que se pueden extraer son: el valor medio, cuatro efectos principales, seis efectos de interacción de dos factores y cuatro efectos de interacción de tres factores. Si se hace el cómputo del número de efectos, se verá que se tratan de 15 informaciones, y no de 16, al igual que el número de experimentos. Esto se debe a que, para más de tres factores, las interacciones superiores a tres suelen suponerse nulas, lo que permite obtener una estimación del error experimental. Falta pues una interacción conjunta de los cuatro factores que se despreció en el cálculo.

Efecto	Cálculo	
<b>promedio</b>	$\beta_0$	$(+y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8) / 8$
<b>A</b>	$\beta_a$	$(-y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8) / 4$
<b>B</b>	$\beta_b$	$(-y_1 - y_2 + y_3 + y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8) / 4$
<b>C</b>	$\beta_c$	$(-y_1 - y_2 - y_3 - y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8) / 4$
<b>A x B</b>	$\beta_{ab}$	$(+y_1 - y_2 - y_3 + y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8) / 4$
<b>A x C</b>	$\beta_{ac}$	$(+y_1 - y_2 + y_3 - y_4 + y_5 - y_6 + y_7 - y_8) / 4$
<b>B x C</b>	$\beta_{bc}$	$(+y_1 + y_2 - y_3 - y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8) / 4$
<b>A x B x C</b>	$\beta_{abc}$	$(-y_1 + y_2 + y_3 - y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8) / 4$

Tabla 12. Cálculo de los efectos para un experimento con tres factores

Los signos aplicados a las diferentes respuestas en la Tabla 12 se obtienen de la denominada *matriz de los efectos*, donde, aplicando la regla de los signos, se multiplican los signos + y – de los niveles correspondientes a cada factor en cada combinación para obtener los signos correspondientes a las interacciones entre los mismos (ver Tabla 13).

	promedio	A	B	C	A x B	A x C	B x C	A x B x C
<b>1</b>	+	–	–	–	+	+	+	–
<b>2</b>	+	+	–	–	–	–	+	+
<b>3</b>	+	–	+	–	–	+	–	+
<b>4</b>	+	+	+	–	+	–	–	–
<b>5</b>	+	–	–	+	+	–	–	+
<b>6</b>	+	+	–	+	–	+	–	+
<b>7</b>	+	–	+	+	–	–	+	–
<b>8</b>	+	+	+	+	+	+	+	+

Tabla 13. Matriz de los efectos para un experimento con tres factores

Con los resultados obtenidos, se pueden extraer las conclusiones pertinentes dependiendo del valor que tome cada efecto, como se verá en el apartado de resultados. Para ello, es necesario conocer qué indica cada efecto.

El **valor medio** indica alrededor de qué valor han variado las respuestas. Los **efectos principales** miden cómo afecta cada factor a la respuesta. Si el efecto tiene signo negativo indica que es preferible el nivel inferior de su dominio experimental. Asimismo, existen **efectos de interacción** si el efecto que tiene un factor sobre una determinada respuesta depende del nivel al que se encuentre otro factor.

Es por ello que antes de interpretar los efectos principales, hay que considerar si existen efectos de interacción significativos. Si es así, no se puede interpretar individualmente el valor de cada efecto principal.

Por otro lado, con los efectos calculados, podemos ajustar un modelo de regresión multivariante por el método de mínimos cuadrados. Siguiendo el ejemplo anterior de los tres factores A, B y C, la ecuación quedaría de la siguiente forma:

*Ecuación 1*

$$y = \beta_0 + \underbrace{\beta_a x_a + \beta_b x_b + \beta_c x_c}_{\text{Efectos principales}} + \underbrace{\beta_{ab} x_a x_b + \beta_{ac} x_a x_c + \beta_{bc} x_b x_c + \beta_{abc} x_a x_b x_c}_{\text{Interacciones}} + \varepsilon$$

siendo

$x_a, x_b$  y  $x_c$  los factores;

$\beta_0, \beta_a, \beta_b, \beta_c, \beta_{ab}, \beta_{ac}, \beta_{bc}$  y  $\beta_{abc}$  los coeficientes lineales a determinar con los datos;

$\varepsilon$  el error experimental.

Análogamente, la ecuación para el experimento con cuatro factores quedaría como se muestra en la Ecuación 2, teniendo en cuenta que se desprecia el efecto de interacción entre los cuatro factores.

*Ecuación 2*

$$y = \beta_0 + \beta_a x_a + \beta_b x_b + \beta_c x_c + \beta_d x_d + \beta_{ab} x_a x_b + \beta_{ac} x_a x_c + \beta_{ad} x_a x_d + \beta_{bc} x_b x_c + \beta_{bd} x_b x_d + \beta_{cd} x_c x_d + \beta_{abc} x_a x_b x_c + \beta_{abd} x_a x_b x_d + \beta_{acd} x_a x_c x_d + \beta_{bcd} x_b x_c x_d + \varepsilon$$

### 3.2.2 Diseño y fabricación de las probetas

El diseño de las probetas debía estar orientado principalmente a su ensayo en la máquina de tracción. Por ello, se decidió fabricar probetas de tipo halterio. Tras consultar la normativa vigente sobre ensayos en materiales poliméricos, no se encontró ninguna norma relacionada sobre ensayos en piezas fabricadas mediante modelado por deposición fundida. Es por ello que se decidió basar el diseño de las mismas en la norma UNE- EN ISO 527-2 [36], donde se detallan las condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión para la determinación de sus propiedades a tracción.

Esta norma propone realizar el ensayo con varios tipos de probetas: las de tipo 1 (normales), y las de tipo 5 (pequeñas). A su vez, existen diferentes subtipos dentro de estas dos divisiones. La mayor facilidad para realizar las medidas en las de tipo 1 (más grandes) y la siguiente aclaración escrita en la norma: “*los resultados obtenidos con probetas pequeñas no son comparables a los obtenidos con probetas tipo 1*” decantaron la elección por las probetas de tipo 1.

Finalmente, la probeta empleada fue la **ISO 527-2/1B**.

El proceso a seguir para la fabricación de una probeta es el descrito en la “*Ilustración 10. Diagrama de flujo para fabricar una pieza en 3D*”.



Para el modelado CAD de las probetas se empleó el software **SolidWorks 2013** (Ilustración 42). En el **ANEXO I**, se detalla un plano con las dimensiones de la misma.

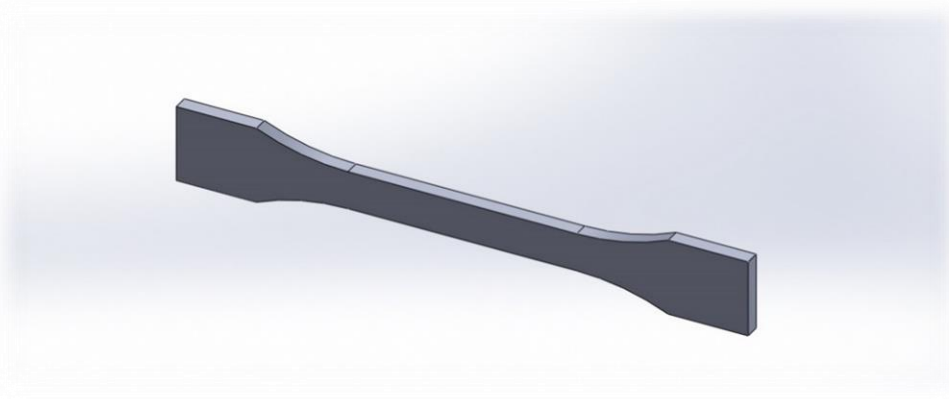


Ilustración 42. Modelado de la probeta ISO 527-2/1B en SolidWorks 2013.

Una vez exportado desde *SolidWorks* el modelo 3D en formato *.STL* se empleó el programa **Repetier Host**, y dentro del mismo el software de laminado **Slic3r**, para configurar la impresión y generar el *.GCODE* que se cargaría en el firmware de la impresora.

Dadas las dimensiones de las probetas, y el área de impresión disponible (aproximadamente 20x20 cm), se decidió imprimir las probetas en tiradas de tres, aprovechando la decisión de fabricar tres muestras por combinación en el experimento factorial.

En la *Ilustración 43* se puede observar una captura con la imagen virtual de las probetas situadas dentro del volumen de impresión disponible. Las líneas de color verde corresponden a las trayectorias del cabezal dispensador sin deposición de material programada.

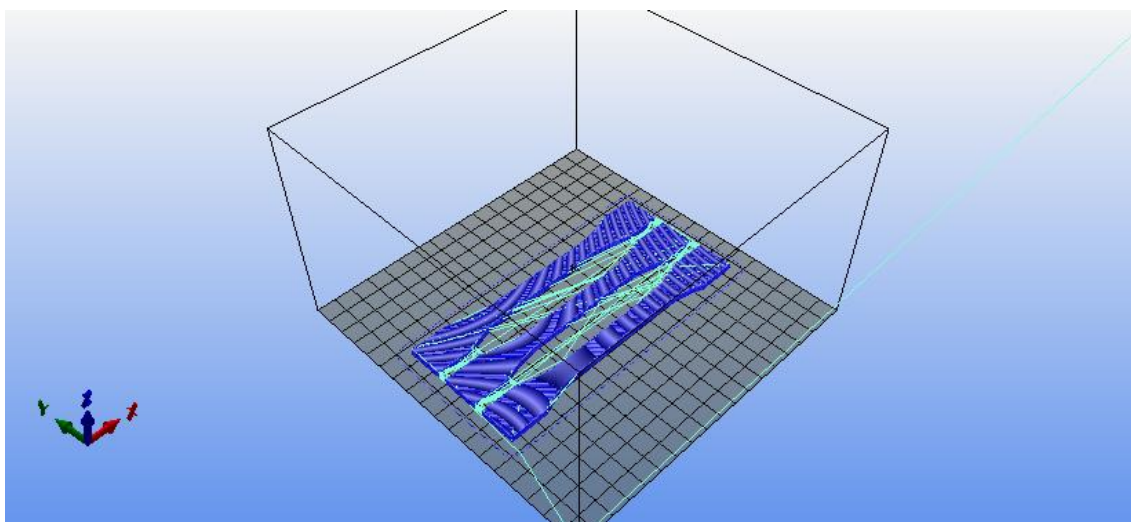


Ilustración 43. Captura de Repetier Host. Probetas en la cama de impresión, vista de trayectorias.

El software encargado de generar el *.GCODE* a partir del archivo *.STL* importado en *Repetier Host* es *Slic3r*. El programa corta el modelo en rebanadas horizontales (capas), genera las trayectorias para rellenarlas y calcula la cantidad de material a extruir.

*Slic3r* presenta una interfaz de usuario como la mostrada en la *Ilustración 44*.

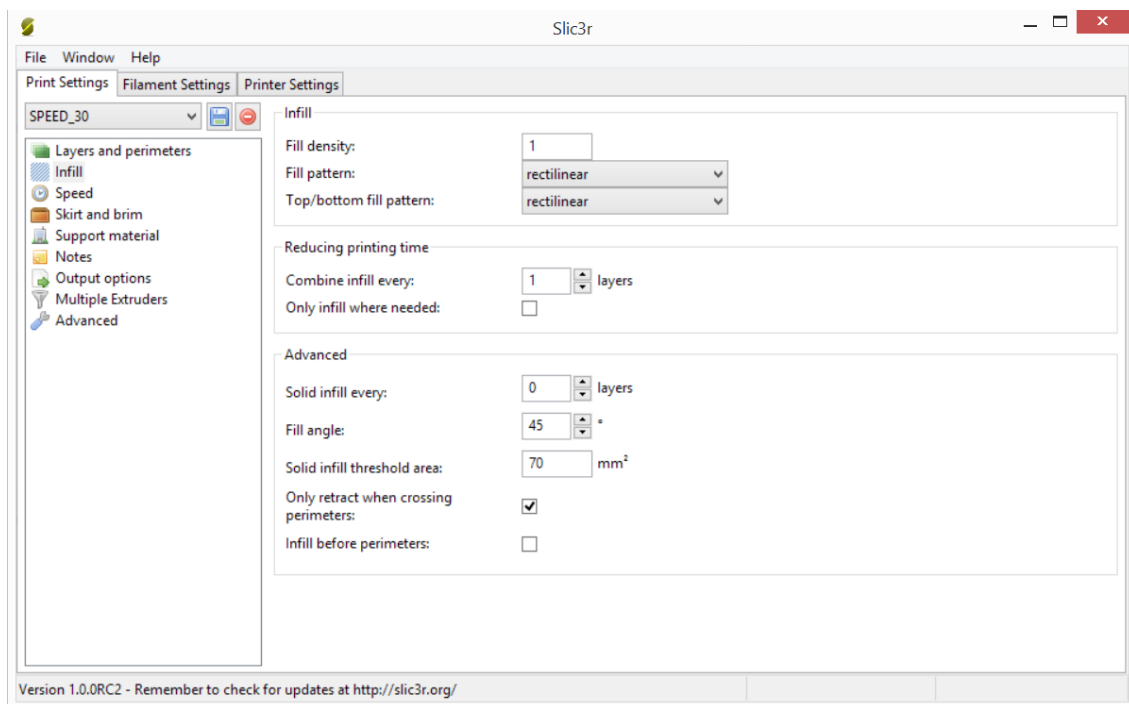


Ilustración 44. Interfaz de usuario de Slic3r

El programa permite configurar una multitud de parámetros. En el siguiente blog en español<sup>10</sup>, se puede encontrar una pequeña descripción de cada uno de ellos. La configuración completa se subdivide en tres grandes bloques: *configuraciones de impresión*, *de filamento* y *de la impresora*. Dentro de esos bloques, se pueden ajustar las condiciones de impresión variando diferentes parámetros correspondientes a cada aspecto técnico de la impresión (ver Ilustración 45).

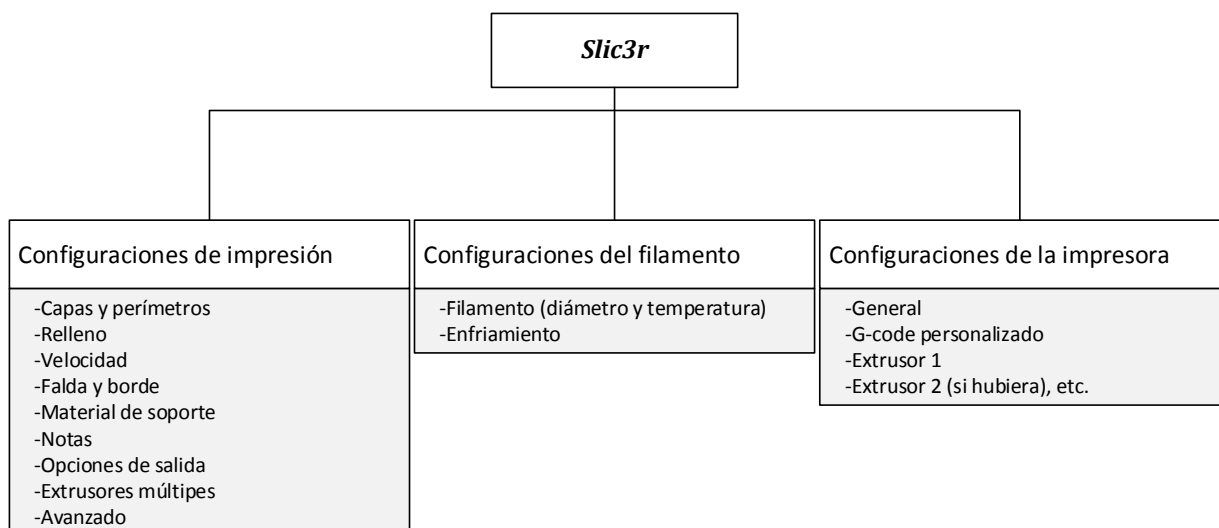
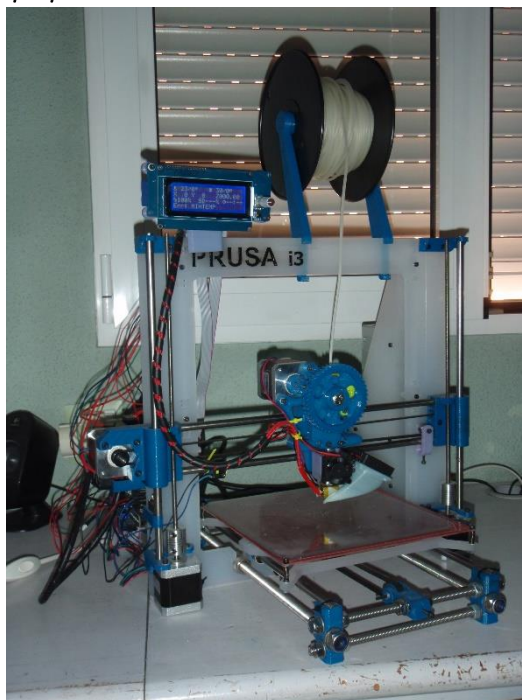


Ilustración 45. Bloques de configuración de parámetros de impresión en Slic3r

<sup>10</sup> <http://ultra-lab.net/blog/gu%C3%ADa-de-slic3r-an%C3%A1lisis-de-todos-los-par%C3%A1metros>

Las configuraciones de *Slic3r* empleadas a la hora de imprimir las probetas son las que se detallan en el **ANEXO II**.

### 3.2.2.1 Impresora RepRap tipo Prusa i3



*Ilustración 46. Fotografía de la Prusa i3 montada y empleada en este trabajo*

Para el presente trabajo, se llevó a cabo la compra de componentes y el montaje de una impresora *RepRap Prusa i3* por parte del autor. Cuando se planteó el montaje de la máquina, se dudó entre construir el modelo anterior, la *Prusa iteración 2*, o la que finalmente se construyó. El principal motivo para haber construido la *Prusa iteración 2* era que, por aquellas fechas, ese modelo de impresora estaba mucho mejor documentado en Internet, muy en parte gracias a la labor del profesor de robótica Juan González Gómez. Tras una búsqueda de información y consejo inicial, se decidió construir el último modelo debido a su mayor sencillez de montaje y efectividad. Por otro lado, muchos aspectos, sobre todo relacionados con la electrónica, eran análogos al modelo anterior y se podía aprovechar la documentación existente.

La compra de componentes se realizó principalmente de productos provenientes del continente asiático, debido a sus precios competitivos y la limitación de costes. Tras largos tiempos de espera, el montaje de la máquina comenzó en septiembre de 2013, llegándose en ese mismo mes a un primer prototipo que extrudía filamento pero no era funcional.

Tras impresiones de prueba, ajustes y calibraciones, y la sustitución de algunos componentes que habían salido defectuosos (como el *hot-end*), se llegó a un modelo funcional apto para fabricar las probetas objeto de este estudio.

En el **ANEXO III** se puede encontrar la lista de materiales y costes de los componentes de la impresora, sin tener en cuenta las piezas sustituidas, herramientas o sobrecostes. Es decir, es el coste que tendría la impresora si se construyera correctamente desde el principio, sin errores en su desarrollo. Así mismo, en la *Tabla 14* se detallan las principales especificaciones técnicas de la misma.

Especificaciones técnicas	
<b>Electrónica</b>	- Arduino MEGA 2560 rev + RAMPS 1.4 - Pantalla de LCD con encoder rotativo con pulsador para la navegación
<b>Alimentación</b>	- Fuente de alimentación de 220V/110V AC (seleccionable) a 12V DC
<b>Comunicaciones</b>	- Lector de tarjetas SD - Puerto USB tipo B
<b>Firmware</b>	- Marlin v1 (calibrado específicamente)
<b>Mecánica general</b>	- Marco y base de metacrilato color hielo de espesor 6mm - Barras lisas de acero para los carros X,Y,Z - Rodamiento lineal de bolas LM8UU para X, Y, Z - Varillas roscadas M5 para la transmisión de movimiento del eje Z y acoplamientos flexibles - Sistema de nivelado de base de impresión con 4 puntos y amortiguación - Motores paso a paso Nema 17 - Piezas impresas en PLA
<b>Extrusor</b>	- Greg's Wade Extruder (modificado)
<b>Hot-end</b>	- All-metal E3D v5
<b>Nozzle</b>	- 0.4 mm
<b>Volumen de impresión</b>	- 20 x 20 x 20 cm (aproximadamente)
<b>Materiales de impresión testeados</b>	- ABS y PLA

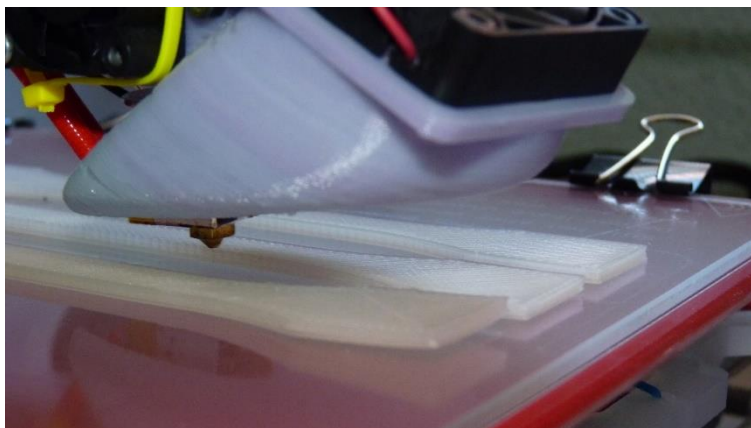
Tabla 14. Especificaciones técnicas de la impresora Prusa i3 montada para el trabajo

### 3.2.2.2 Impresión de las probetas

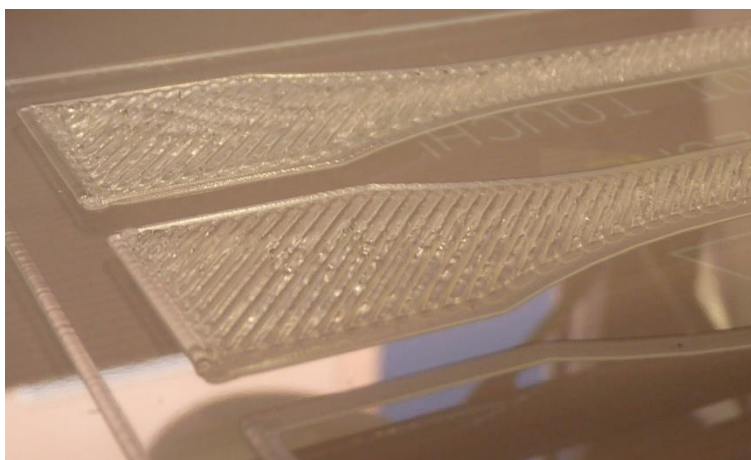
El tiempo total de impresión de todas las probetas fue aproximadamente de **27 horas**. Las muestras correspondientes a una velocidad de 60 mm/s tardaban una media de 1h17min, y a velocidad de 30 mm/s 2h05min.

Como adherente a la cama de impresión se empleó **laca**. No obstante, al imprimir con la base en frío, se producía el denominado *warping*, como se muestra en la *Ilustración 47*. Por ello se recurrió al uso de **silicona líquida**, que extendida sobre la cama de impresión, creaba una película pegajosa sobre la que poder imprimir. Como contrapunto, esto tuvo el inconveniente de una adhesión demasiado fuerte, y algunas de estas probetas impresas con la base en frío, perdieron algunos fragmentos de su primera capa.

Como ya se comentó en el punto 1.9, el ajuste de la distancia inicial del *nozzle* respecto a la cama de impresión supuso un problema tedioso. Algunas de las impresiones se produjeron con una distancia inicial demasiado cercana, tocando la cama de impresión, lo que provocó que se produjeran surcos en las primeras capas (*ver Ilustración 48*) y repercutió, entre otras cosas, al correcto apilamiento de las capas y a la apariencia visual de estas probetas. Esto se verá claramente en las fotografías tomadas al microscopio estereoscópico.



*Ilustración 47. Detalle del "warping" que se produjo durante la impresión con la base en frío*



*Ilustración 48. Detalle de los "surcos" producidos por imprimir con el nozzle tocando la cama de impresión*

Se muestran a continuación una fotografía de una de las combinaciones impresa (*Ilustración 49*) y otra de todas las probetas a analizar enumeradas y clasificadas (*Ilustración 50*).



*Ilustración 49. Detalle de las probetas de la combinación 13*



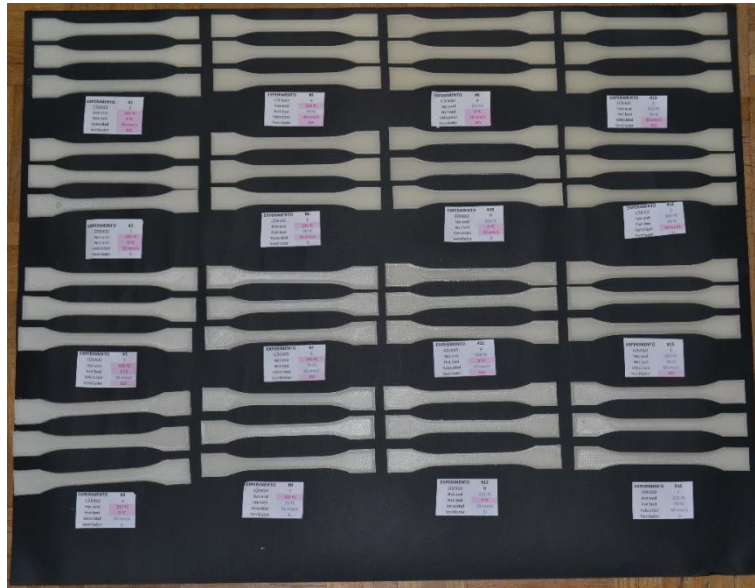


Ilustración 50. Fotografía de todas las probetas ordenadas y clasificadas

### 3.2.3 Ensayos a tracción de las probetas

Los ensayos a tracción se llevaron a cabo en la máquina de ensayos universal **Shimadzu Autograph AG-I** presente en los laboratorios del *Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química* de la UC3M. (Ilustración 51)

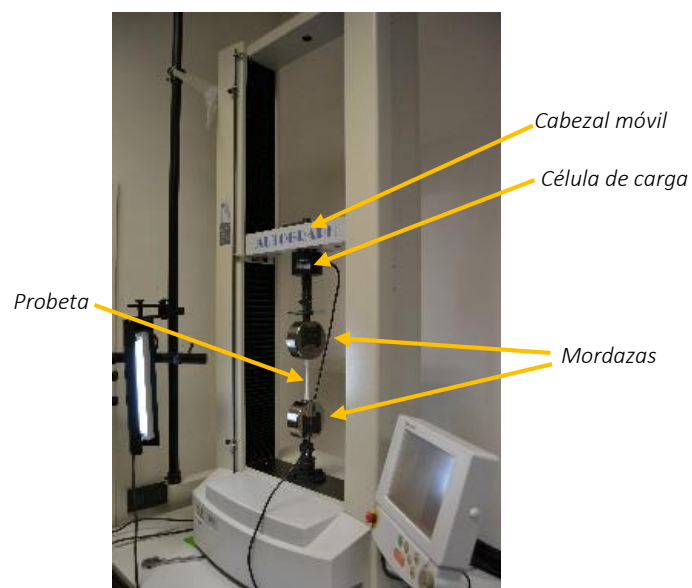


Ilustración 51. Máquina de ensayos universal "Shimadzu Autograph AG-I"

Fue necesaria la instalación de células de carga de 5KN, ya que las de 1KN colocadas en la máquina eran insuficientes para romper completamente las probetas. La velocidad de ensayo fue constante e igual para todas las probetas y de 5 mm/min.

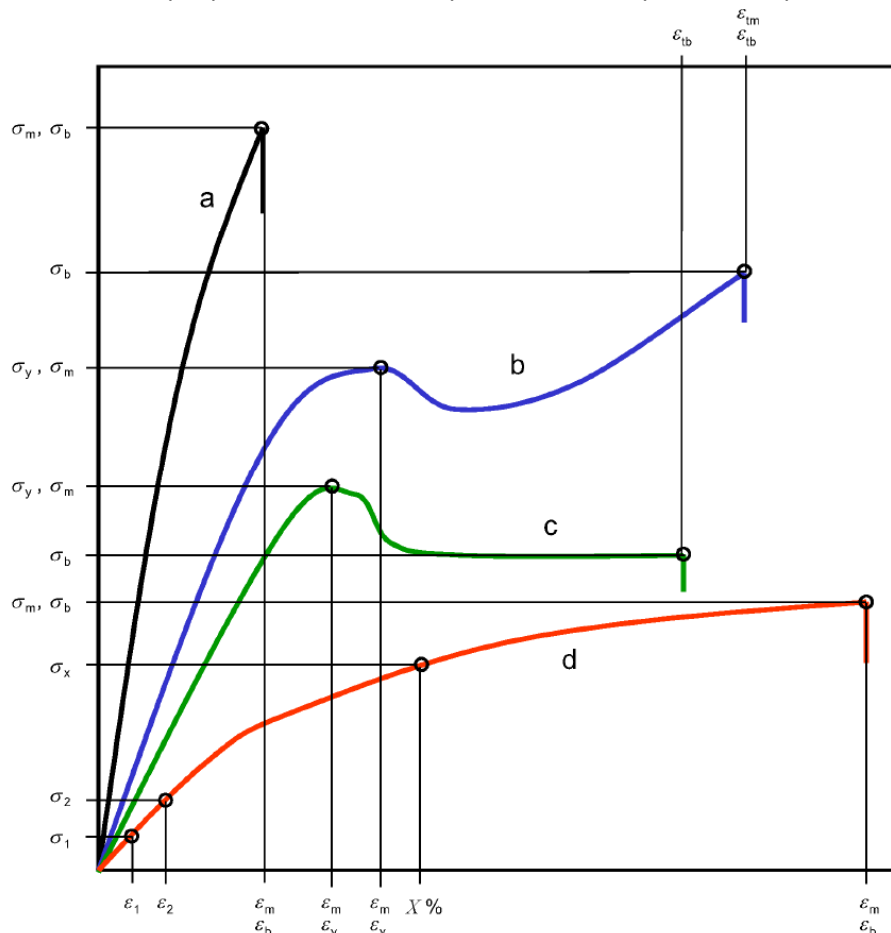
### 3.2.3.1 Principio y métodos

La probeta se somete a tracción a lo largo de su eje longitudinal principal, a una velocidad constante, hasta que rompe (ver *Ilustración 52* y *enlace a vídeo*). Durante este procedimiento se mide la carga que soporta la probeta y el alargamiento que experimenta.



*Ilustración 52. Detalle de una probeta recién ensayada*

En la *Ilustración 53*, la curva (a) representa un material frágil, rompe a bajas deformaciones sin presentar punto de fluencia. La curva (d) representa un material blando del tipo caucho que rompe a deformaciones muy elevadas (>50%). [37] Como veremos más adelante, las curvas de esfuerzo-deformación que presenta el PLA se aproximan a la representada por la curva (c).



*Ilustración 53. Curvas típicas de esfuerzo/deformación [37]*

Se presenta a continuación una definición de los términos que aparecen en el gráfico:

- Esfuerzo,  $\sigma$

Fuerza perpendicular por unidad de superficie de la sección transversal inicial en la longitud de referencia.

*\* Se expresa en megapascuales (MPa).*

*\* Para diferenciarlo del esfuerzo real asociado a la sección transversal real de la probeta, este esfuerzo se denomina con frecuencia “esfuerzo de ingeniería”.*

- Esfuerzo de fluencia,  $\sigma_y$

Esfuerzo en el punto de fluencia.

*\* Se expresa en megapascuales (MPa).*

*\* Puede ser inferior al valor máximo del esfuerzo que puede alcanzarse (véase Ilustración 53, curvas b y c).*

- Resistencia,  $\sigma_m$

Esfuerzo en el primer máximo local observado durante un ensayo de tracción.

*\* Se expresa en megapascuales (MPa).*

*\* Este puede ser también el esfuerzo en el que la probeta fluye o rompe (véase Ilustración 53).*

- Esfuerzo a x % de deformación,  $\sigma_x$

Esfuerzo para el que la deformación alcanza el valor especificado x expresado en porcentaje.

*\* Se expresa en megapascuales (MPa).*

*\* El esfuerzo a x % de deformación puede ser útil, por ejemplo, si la curva esfuerzo-deformación no presenta punto de fluencia véase Ilustración 53, curva d).*

- Esfuerzo en el punto de rotura,  $\sigma_b$

Esfuerzo al que la probeta rompe.

*\* Se expresa en megapascuales (MPa).*

*\* Valor más alto del esfuerzo de la curva esfuerzo-deformación justo antes de la separación de la probeta, es decir, justo antes de la caída de la carga provocada por la iniciación de fisuras.*

- Deformación,  $\epsilon$

Incremento de la longitud por unidad de longitud inicial de la longitud de referencia.

*\* Se expresa como una relación adimensional o en porcentaje (%).*

- Deformación en el punto de fluencia,  $\epsilon_y$

Primera ocasión en un ensayo de tracción en la que se produce un incremento de la deformación sin un incremento del esfuerzo.

*\* Se expresa como una relación adimensional o en porcentaje (%).*

*\* Véase la Ilustración 53, curvas b y c.*



- Deformación en el punto de rotura,  $\varepsilon_b$

Deformación en el último punto registrado antes de que el esfuerzo se reduzca a un valor inferior o igual al 10% de la resistencia si se produce la rotura antes que la fluencia.

\* Se expresa como una relación adimensional o en porcentaje (%).

\* Véase la Ilustración 53, curvas a y d.

- Deformación en la resistencia,  $\varepsilon_m$

Deformación a la que se alcanza la resistencia.

\* Se expresa como una relación adimensional o en porcentaje (%).

### 3.2.3.2 Registro de datos

Para el registro de datos se empleó un PC con un software de adquisición de datos instalado conectado a la máquina, que registraba la fuerza y los valores correspondientes del incremento de la distancia entre las mordazas durante el ensayo.

### 3.2.3.3 Cálculo y expresión de los resultados

Tras el ensayo de todas las probetas se exportaron los datos obtenidos para su posterior análisis con **MATLAB**. Con los datos obtenidos se calcularon los siguientes términos.

- Esfuerzo

*Ecuación 3*

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

donde

$\sigma$  es el valor del esfuerzo en cuestión, expresado en megapascuales (MPa);

$F$  es la fuerza medida implicada, expresada en newtons (N);

$A_0$  es el área de la sección transversal inicial de la probeta, expresada en milímetros cuadrados (mm<sup>2</sup>).

- Deformación nominal

Se registra el desplazamiento entre las mordazas de la máquina desde el comienzo del ensayo.

Se calcula la deformación nominal mediante:

*Ecuación 4*

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L_t}{L_0}$$

donde

$\varepsilon_t$  es la deformación nominal, expresada como una relación adimensional;

$L_0$  es la distancia inicial entre las mordazas, expresada en milímetros (mm);

$\Delta L_t$  es el incremento en la distancia entre las mordazas, expresado en milímetros (mm), que se produce desde el inicio del ensayo.

- Módulo de elasticidad en tracción. Pendiente secante

Ecuación 5

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

donde

$E_t$  es el módulo de elasticidad en tracción, expresado en megapascuales (MPa);

$\varepsilon_1$  es el valor de deformación, expresada como una relación adimensional, que se midió en el valor de esfuerzo 5MPa

$\varepsilon_2$  es el valor de deformación, expresada como una relación adimensional, que se midió en el valor de esfuerzo 10MPa

*\*estos dos últimos valores (5 y 10MPa, respectivamente) no se escogieron siguiendo la norma, sino ahí donde la gráfica presentaba un comportamiento lineal para todas las muestras.*

### 3.2.4 Medida de la densidad

#### 3.2.4.1 Picnómetro

Para determinar la densidad del filamento de partida y la densidad de las probetas fabricadas se ha utilizado la picnometría de helio, que se basa en el principio de desplazamiento de fluido de Arquímedes y en la ley de Boyle para determinar el volumen y densidad del material. El picnómetro empleado es el modelo *Accupyc 1330 de Micrometrics*. Con este equipo se determinan presiones con las que se calcula el volumen correspondiente, utilizando la ecuación de los gases perfectos. La muestra previamente se pesa, se purga el equipo con gas inerte (He) y, tras aplicar vacío, se llena con el gas y se mide la presión, a partir de la cual se calcula el volumen de gas. [38]

Para determinar el volumen de la muestra se utiliza la ecuación siguiente:

Ecuación 6

$$V_p = (V_c - V_r) \left( \frac{P_1}{P_2} - 1 \right)$$

donde

$V_p$  es el volumen de la muestra;

$V_c$  es el volumen de la celda;

$V_r$  es el volumen de referencia;

$P_1$  y  $P_2$  son presiones de medida.

Con las primeras medidas, el picnómetro no daba unos resultados convincentes. Por ello se procedió a las medidas de las densidades mediante el método de Arquímedes.

### 3.2.4.2 Determinación de la densidad mediante el método de Arquímedes



Ilustración 54. Balanza de precisión Satorius CP64

De acuerdo con el **principio de Arquímedes**, la fuerza neta que actúa sobre un cuerpo de volumen  $V$  y masa  $M$  sumergido en un fluido en reposo de densidad  $\rho$  viene dada por:

Ecuación 7

$$\sum \vec{F} = \rho g V \vec{e}_z - \rho_s g V \vec{e}_z = (\rho - \rho_s) g V \vec{e}_z$$

Donde  $\rho_s = M/V$  representa la densidad media del cuerpo. En el caso de un cuerpo libre, el cuerpo se mantendrá en reposo cuando la fuerza de flotación sea exactamente igual al peso,  $\rho_s = \rho$ . En estos casos el cuerpo tendrá **flotabilidad neutra** y permanecerá en el punto en el que se le sumerja. Si por el contrario la fuerza de flotación es mayor que el peso (**flotabilidad positiva**,  $\rho_s < \rho$ ) el objeto subirá hasta alcanzar la superficie, mientras que si es menor (**flotabilidad negativa**,  $\rho_s > \rho$ ) el objeto se hundirá, deteniéndose solo al alcanzar el fondo. [39]

Como el PLA tiene una densidad mayor que la del agua, nos encontramos en el caso de flotabilidad negativa, por lo que podremos calcular su densidad siguiendo el siguiente procedimiento:

1. Pesar la muestra al aire.
2. Pesar la muestra sumergida en agua destilada.
3. Con los datos obtenidos anteriormente, y conocida la densidad del agua, se deduce la densidad del sólido mediante el siguiente razonamiento.

La fuerza de empuje  $E$  que actúa sobre el cuerpo es el peso real del mismo  $P$  menos el peso aparente  $P_a$  que tiene cuando está sumergido.

Ecuación 8

$$E = P - P_a$$

El principio de Arquímedes nos dice que esta fuerza de empuje es igual al peso del volumen de fluido desalojado.

Ecuación 9

$$E = \rho V g$$

Y este volumen, que es igual al del cuerpo sumergido es igual a:

$$V = \rho_s m_s$$

Combinando las anteriores ecuaciones, se obtiene:

$$\rho_s m_s = \frac{P - P_a}{\rho g}$$

Tras algunas transformaciones, resulta:

$$\rho_s = \frac{P}{P - P_a} \cdot \rho = \frac{m_{s \text{ aire}} g}{m_{s \text{ aire}} g - m_{s \text{ sumergido}} g} \cdot \rho$$

Finalmente, el método de Arquímedes establece que la densidad del sólido es igual a:

*Ecuación 13. Fórmula para calcular la densidad de un sólido mediante el método de Arquímedes*

$$\rho_{\text{sólido}} = \frac{m_{s \text{ aire}}}{m_{s \text{ aire}} - m_{s \text{ sumergido}}} \cdot \rho_{\text{agua}}$$

Para la medida de la masa, se empleó una balanza analítica modelo Sartorius CP64 (*Ilustración 54*), cuyas principales características técnicas son las mostradas en la *Tabla 15*.

Legibilidad(mg)	Capacidad(g)
0,1	62

*Tabla 15. Características técnicas de la balanza de precisión Sartorius CP64*

La densidad del agua saturada depende de la temperatura a la que ésta se encuentre. Medida con un termómetro en el laboratorio, esta temperatura era de 25°C (298,15K). A partir de este dato, se obtiene la densidad del agua de una tabla con las “*Propiedades Termofísicas del Agua Saturada*” [40] (*Tabla 16*).

Temperatura (K)	Volumen específico (m³/kg)
295	1002
300	1003

*Tabla 16. Volumen específico del agua saturada a 295 y 300K*

Mediante interpolación lineal, se tiene que:

$$v_f(298,15K) = 1002,63 \text{ m}^3/\text{Kg} \Rightarrow \rho_f = 1/v_f = \mathbf{0,9974 \text{ g/cm}^3}$$

Se midieron las densidades de una muestra de cada experimento y la del filamento con el que se fabricaron las probetas.

Cabe la posibilidad de que las muestras de PLA presentasen porosidad por lo que el agua destilada podría introducirse en el interior de las mismas. Por ello se decidió repetir la medida de densidades **recubriendo las muestras con laca** para tapan los posibles poros. Se aplicó igualmente el método de Arquímedes. No obstante, la fórmula cambia al entrar en juego la laca. Se utilizó la siguiente fórmula [38]:

$$\rho_{\text{sólido}} = \frac{m_{s \text{ aire}}}{\left( \frac{m_{s \text{ con laca aire}} - m_{s \text{ con laca sumergido}}}{\rho_{\text{agua}}} \right) - \left( \frac{m_{s \text{ con laca aire}} - m_{s \text{ aire}}}{\rho_{\text{laca}}} \right)}$$

La densidad de la laca transparente empleada para recubrir las muestras es igual a 1,2 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.2.5 Microscopía estereoscópica

La primera evaluación visual de la superficie de fractura y su zona más próxima se llevó a cabo con un microscopio estereoscópico *OLYMPUS SZ-CTV* (Ilustración 55). La toma de imágenes se realizó mediante una cámara *OLYMPUS SC20* acoplada al mismo y conectada a un PC con software de captura de imágenes especializado por USB 2.0.

Un microscopio óptico común puede ser monocular o binocular, y proporciona grandes aumentos para visualizar preparados en láminas muy finas iluminadas desde abajo, de modo que sean atravesadas por la luz.

Sin embargo, el microscopio estereoscópico es siempre binocular y proporciona una visión tridimensional, proporciona aumentos menores ya que sirve para observar cuerpos sólidos y opacos. Por este motivo es oportuno utilizar un microscopio dotado de iluminador para así observar los detalles más ocultos del objeto estudiado. Por norma la iluminación es incidente (desde arriba) aunque a veces es importante también disponer del iluminador también en la base para examinar cuerpos que tienen la propiedad de la transparencia (no en este caso). [41]



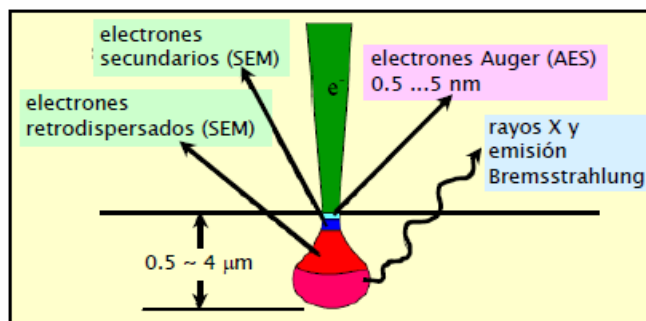
Ilustración 55. Microscopio estereoscópico *OLYMPUS SZ-CTV*

Se tomaron imágenes de cada muestra desde diferentes perspectivas y con diferentes aumentos.

### 3.2.6 Microscopía electrónica de barrido

Más conocida como SEM, de sus siglas en inglés *Scanning Electron Microscopy*, utiliza un haz de electrones en lugar de luz para formar la imagen. El modelo empleado fue un Philips XL-30 con filamento de tungsteno, utilizando un potencial acelerador de 5KV.

Un haz de electrones barre la muestra en condiciones de vacío escaneando su superficie. Se utilizan diferentes tipos de señales: electrones secundarios y electrones retrodispersados (ver *Ilustración 56*).

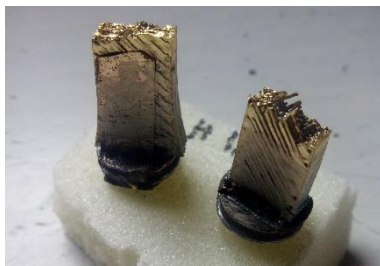


*Ilustración 56. Interacción de electrones de alta energía con muestras sólidas [42]*

Estas señales se recogen mediante diferentes detectores para crear una imagen aumentada. Los electrones retrodispersados son direccionales, por lo que sólo revelan detalles de la muestra que estén en línea con el sistema de detección. Su número aumenta cuando aumenta el número atómico de los elementos de la muestra, permitiendo obtener contraste debido a la composición. Los electrones secundarios que se reflejan no son direccionales, lo que se traduce en que revelan detalles topográficos de la muestra y se forma una imagen de apariencia tridimensional, que es lo que interesaba obtener de la superficie de fractura.

Las muestras poco conductoras o no conductoras (como en el caso del PLA) tienen que ser recubiertas con una capa conductora para poder ser caracterizadas al SEM, si no la muestra se cargaría estáticamente y no se podría formar bien la imagen. Se emplean finas capas de oro o carbón depositadas sobre la superficie del material mediante *PVD (Physical Vapor Deposition)*. [43]

En este caso, se empleó el oro como material de recubrimiento de las muestras (*Ilustración 57*).



*Ilustración 57. Muestras recubiertas de oro para su caracterización en el SEM*

### 3.2.7 Análisis térmico

La definición generalmente aceptada de análisis térmico abarca al grupo de técnicas en las que se mide una propiedad física de un sistema (en este caso un material, el PLA) en función de la temperatura mientras se le somete a un programa de temperatura controlado. Los efectos del calor sobre los materiales pueden ser varios y producir cambios en muchas de sus propiedades.

Se pueden distinguir más de una docena de métodos térmicos que difieren en las propiedades medidas y en los programas de temperatura. En el presente trabajo, se han realizado análisis de **termogavimetría (TGA)**, que establece si una muestra pierde o gana peso y cuánto, y

**calorimetría diferencial de barrido (DSC)**, que establece si una reacción o cambio físico es endotérmico o exotérmico, midiendo la variación de calor. [44]

#### 3.2.7.1 Termogavimetría (TGA)

En un análisis termogavimétrico se registra, de manera continua, la masa de una muestra colocada en una atmósfera controlada, o bien en función de la temperatura, o bien en función del tiempo. En este trabajo se han realizado experimentos de los dos modos. Ambos experimentos se llevaron a cabo en un equipo de medida modelo *Perkin Elmer STA 6000*, que mide simultáneamente la pérdida en masa y el calor que emite o absorbe la muestra durante el proceso.

En el primer caso (experimento dinámico), la temperatura de la muestra va aumentando de manera controlada (linealmente con el tiempo). Se utilizaron muestras de aproximadamente 20mg en atmósfera de nitrógeno. La velocidad de calentamiento fue de 5 °C/min y el intervalo de temperaturas estudiado osciló desde los 30 °C hasta los 550 °C.

En el segundo caso (experimento isoterma), la temperatura se mantiene constante durante todo el experimento. En el ensayo en cuestión la temperatura se mantuvo a 195 °C y 215 °C durante dos horas, esta vez en atmósfera de aire para reproducir mejor las condiciones a las que se somete el filamento durante una impresión.

La representación de la masa o del porcentaje de masa en función del tiempo o de la temperatura se denomina *termograma* o *curva de descomposición térmica*. [44]

#### 3.2.7.2 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

La calorimetría diferencial de barrido es una técnica termoanalítica en la que se mide la diferencia de calor entre una muestra y una referencia como una función de la temperatura. El principio básico subyacente a esta técnica es que, cuando la muestra experimenta una transformación física tal como una transición de fase, se necesitará que fluya más (o menos) calor a la muestra que a la referencia para mantener ambas a la misma temperatura. El que la muestra absorba o desprenda calor depende de si el proceso es exotérmico o endotérmico. Los intervalos de temperatura en los que se producen estas variaciones en el flujo de calor quedan registradas pudiéndose determinar los intervalos de fusión y cristalización del material e incluso, en algunas ocasiones, la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ). [45]

En general, el DSC puede trabajar en un intervalo de temperaturas que va desde la temperatura del nitrógeno líquido hasta unos 600 °C. Por esta razón, esta técnica de análisis se emplea para caracterizar aquellos materiales que sufren transiciones térmicas en dicho intervalo de temperaturas. La familia de materiales que precisamente presenta todas sus transiciones térmicas en ese intervalo es la de los polímeros. Por esa razón, el DSC se emplea fundamentalmente para la caracterización de estos materiales y se ha usado en este trabajo para estudiar las transiciones térmicas que presenta el PLA, que se detallarán en el apartado de resultados. [44]

Nuevamente, el equipo de medida utilizado es un Perkin Elmer STA 6000 y los análisis se realizaron en atmósfera de nitrógeno. Las cantidades de muestra utilizadas oscilaron entre los 20 y 25mg. Se utilizó un pocillo de alúmina para depositar las muestras. Éste descansa sobre una referencia de platino. Primeramente se hizo un blanco midiendo las diferencias de temperatura durante el calentamiento entre el pocillo vacío y la referencia. Posteriormente se resta este

blanco al resultado obtenido de medir el pocillo de alúmina con la muestra. La velocidad de calentamiento empleada fue de 5 °C/min y el intervalo de temperaturas analizado osciló entre 30 °C y 550 °C. [45]

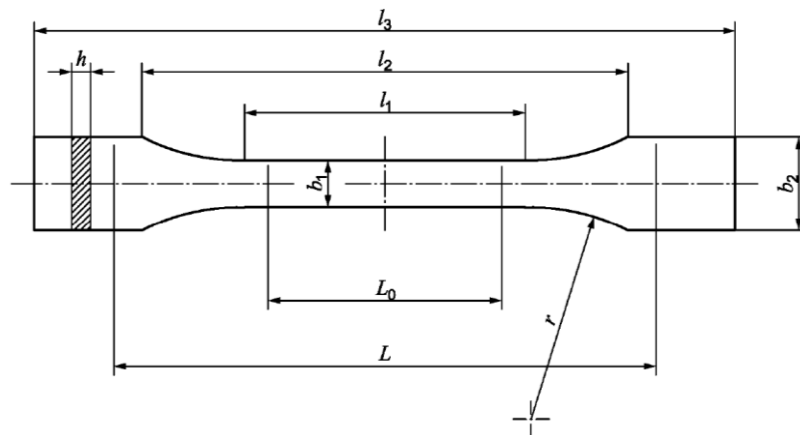


## 4 RESULTADOS

### 4.1 DIMENSIONES DE LAS PROBETAS Y ANÁLISIS VISUAL

Una vez impresas, se midieron dimensiones características de todas las probetas para comparar si había variación dimensional dependiendo de los parámetros de impresión. Para ello se empleó un calibre digital.

Las dimensiones que se midieron fueron  $l_3$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  y  $h$  (ver *Ilustración 58*). Es decir, la longitud, dos anchuras y el grosor. Los valores reales de las mismas y el valor medio de todas las medidas reales se presentan en la *Tabla 17*. Para más información acerca de las dimensiones de las probetas consultar el **ANEXO I**.



*Ilustración 58. Medidas características de la probeta [36]*

Medida	Valor (mm)	Promedio de las medidas (mm)	Error absoluto (mm)	Variación (%)
$l_3$	150	151,61	1,61	1,01
$b_2$	20	20,71	0,71	3,55
$b_1$	10	10,50	0,50	5
$h$	4	4,46	0,46	11,5

*Tabla 17. Dimensiones características y valor medio de las medidas*

En el **ANEXO IV** se presentan todos los datos en una tabla donde se incluyen las medidas anteriormente citadas y una valoración visual y comentarios acerca de las diferentes combinaciones. Hay que puntualizar que dichas valoraciones visuales tienen un carácter subjetivo y fueron llevadas a cabo mediante la opinión de un único experimentador.

A partir de los datos del **ANEXO IV** se elaboraron las siguientes gráficas relativas a las medidas tomadas (*Ilustración 59 a Ilustración 62*). En ellas se representan las medias de las medidas de cada combinación (puntos azules), la media de todas las medidas (línea roja) y el valor real de la medida (línea verde).

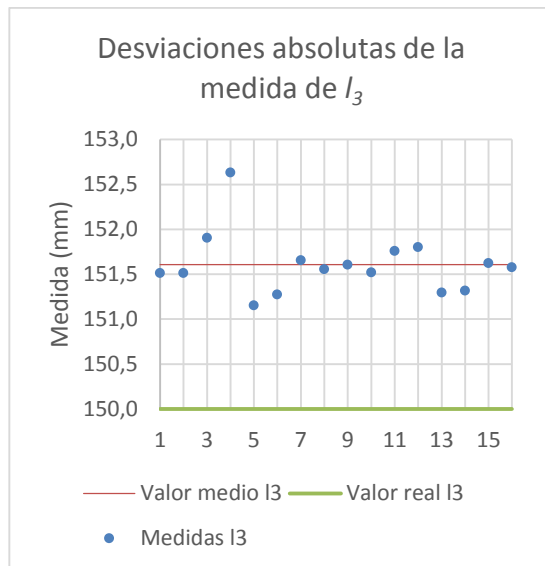


Ilustración 59. Desviaciones absolutas de  $l_3$

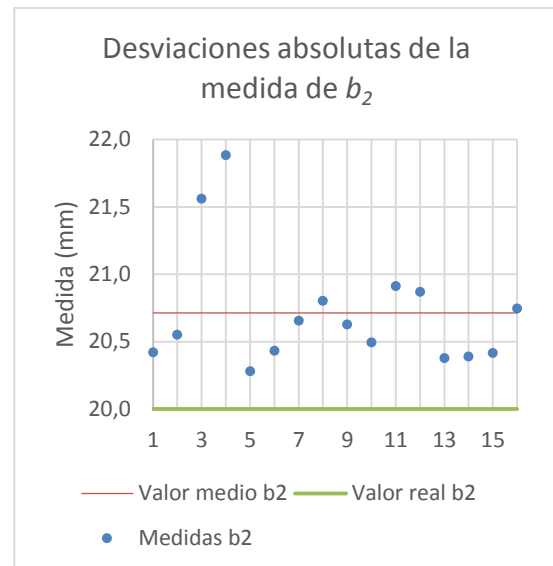


Ilustración 60. Desviaciones absolutas de  $b_2$

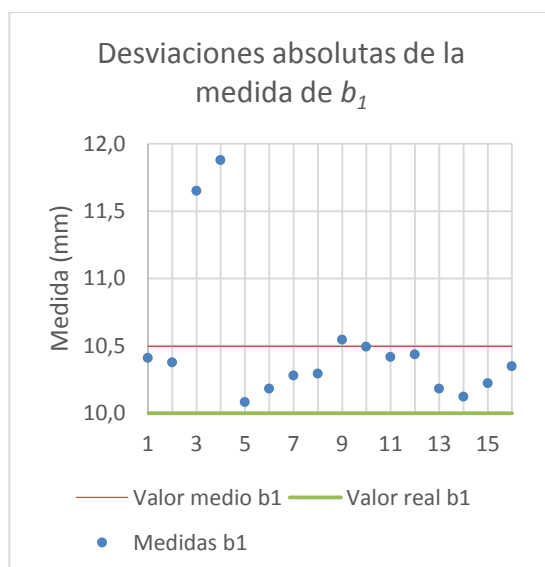


Ilustración 61. Desviaciones absolutas de  $b_1$

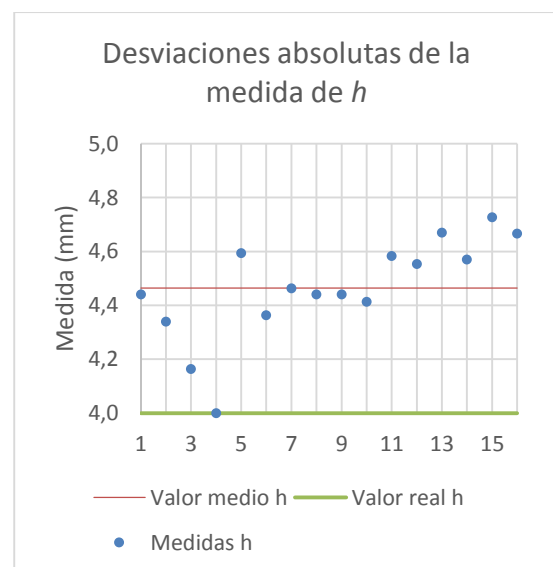


Ilustración 62. Desviaciones absolutas de  $h$

Para comentar estos resultados hay que tener varios aspectos en cuenta.

En primer lugar vemos que todas las medidas están unas décimas de milímetro por encima del valor real. El motivo de este hecho reside en la calibración de la propia máquina. Cuando se montó la máquina hubo que calibrarla para que las piezas fueran fabricadas con las dimensiones reales con las que son diseñadas. Esta calibración no es exacta y requiere de un margen de tolerancia. Se decidió pues que este margen fuera superior, y no inferior, al valor real por el siguiente motivo. Es común la fabricación de piezas en las que se empotran objetos, generalmente metálicos, como tuercas o rodamientos. Esto es, si por ejemplo se quiere empotrar una tuerca como en la *Ilustración 63* para una posterior unión de la pieza, se diseña la misma con un hueco hexagonal con las dimensiones de la tuerca, para posteriormente empotrarla ahí.

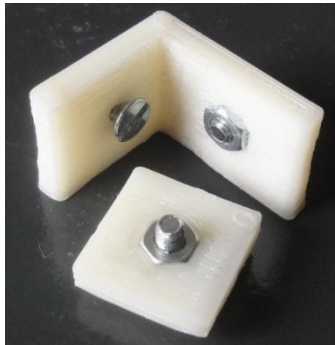


Ilustración 63. Tuercas empotradas en una pieza impresa<sup>11</sup>

Si este margen de tolerancia en la calibración de la máquina fuera por debajo del valor real, el ajuste que tendrían estas incrustaciones sería de apriete y al realizar la incrustación habría que forzar la pieza y podría llegar a romperse. Por eso la máquina está calibrada ligeramente por encima del valor real, para que el ajuste de estas posibles incrustaciones tenga algo de juego.

El segundo aspecto a tener en cuenta es la proporcionalidad entre el error absoluto de la medida de una dimensión respecto a su valor real dependiendo de la magnitud de este valor real.

Antes de explicar esta segunda cuestión, hay que diferenciar entre las medidas de  $l_3$ ,  $b_1$  y  $b_2$  con respecto de  $h$ . No son comparables entre sí en este aspecto. El motivo es el siguiente: las medidas de  $l_3$ ,  $b_1$  y  $b_2$  son dependientes del plano XY, es decir, dependen de los ejes X e Y, donde el movimiento se transmite desde los motores paso a paso mediante una correa de transmisión de tipo GT2. La medida de  $h$  depende del movimiento del eje Z, donde el movimiento se transmite mediante un mecanismo *tuerca-husillo*, en este caso *tuerca-varilla roscada*, por limitaciones económicas. La variación del mecanismo de transmisión, y el tipo de movimiento que sufre cada eje (hay que tener en cuenta que el eje Z sólo se mueve al cambiar de capa, mientras que los ejes X e Y están en continuo movimiento), hacen que las condiciones mecánicas varíen, y por tanto, los resultados.

Volviendo a la comparación de esta segunda cuestión, se ve que el error absoluto de la media de las medidas de  $l_3$  respecto al valor real es de 1,51 mm, el de  $b_2$  es de 0,71 mm y el de  $b_1$  es de 0,50 mm. Es decir, cuanto más grande es la medida, más error absoluto hay. Por otro lado, hay que tener en cuenta que, cuanto menor es la medida, mayor es la variación porcentual de la medida real con la programada. A pesar de esto, es importante tener en cuenta el error absoluto, ya que, por ejemplo a la hora de hacer una incrustación, unas pocas décimas de milímetro es un error tolerable (incluso bueno para tener algo de holgura), pero si este error se hace más grande, puede resultar en que la pieza no cumpla los requisitos necesarios para su uso.

Por otro lado vemos que el error porcentual en la medida de  $h$  (11,5%), la medida ligada al eje Z, es el mayor de todos con diferencia. Esto se debe a la dificultad en el ajuste de la distancia inicial del *nozzle* respecto a la base de impresión que se comentó en los puntos 1.9 y 3.2.2.2 del trabajo.

Por último, en las gráficas de dispersión de las medidas de cada dimensión vemos que los diferentes datos oscilan alrededor de la media total, unos por debajo y otros por encima, pero

<sup>11</sup> [http://www.learobotics.com/wiki/index.php?title=Objeto\\_3D:\\_Piezas\\_con\\_tuercas\\_empotradas](http://www.learobotics.com/wiki/index.php?title=Objeto_3D:_Piezas_con_tuercas_empotradas)

casi siempre manteniendo una desviación absoluta semejante. Hay que exceptuar dos combinaciones, la número 3 y la número 4, que tienen un error apreciablemente mayor que el resto. Estas dos mismas combinaciones, tienen una apariencia notablemente peor que el resto. Este aspecto se comentará en los resultados de la microscopía estereoscópica.

Volviendo a las dimensiones, se ve que la medida de  $h$  en las combinaciones número 3 y 4 son las que tienen un valor más bajo. Esto se debe a que como el *nozzle* estaba tocando la base de impresión, la compresión de las capas es mayor que si estuviera correctamente posicionado. Como respuesta, las medidas correspondientes al plano horizontal ( $l_3$ ,  $b_1$  y  $b_2$ ) son más elevadas, ya que esta compresión vertical, se ve reflejado en un aumento de las dimensiones horizontales, en un concepto semejante al efecto medido por el coeficiente de Poisson.

Si analizamos las siguientes gráficas (Ilustración 64, Ilustración 65 e Ilustración 66), donde se compara cada medida del plano horizontal con la medida de  $h$ , vemos que en aquellas medidas donde  $h$  es más alta,  $l_3$ ,  $b_1$  y  $b_2$  son más bajas, y viceversa. Donde mejor se aprecia es en los puntos correspondientes a los experimentos número 3 y 4.

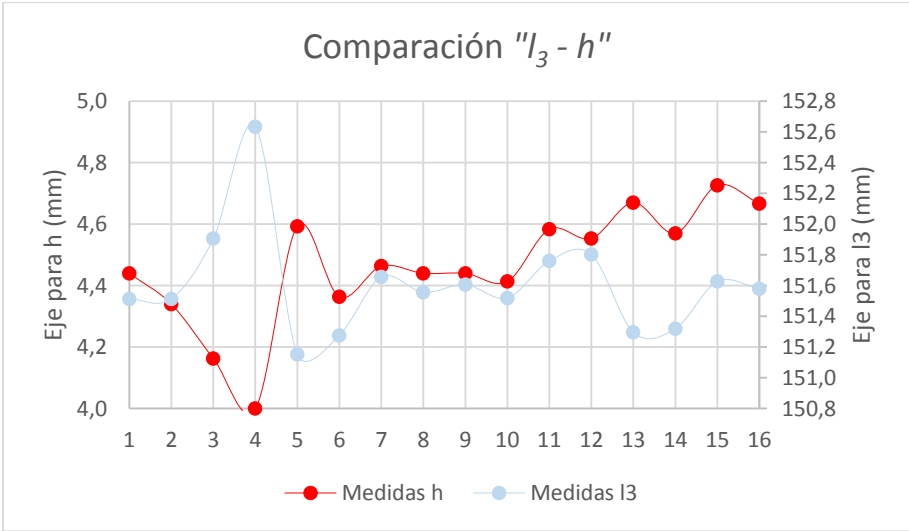


Ilustración 64. Comparación de las medidas de  $l_3$  y  $h$

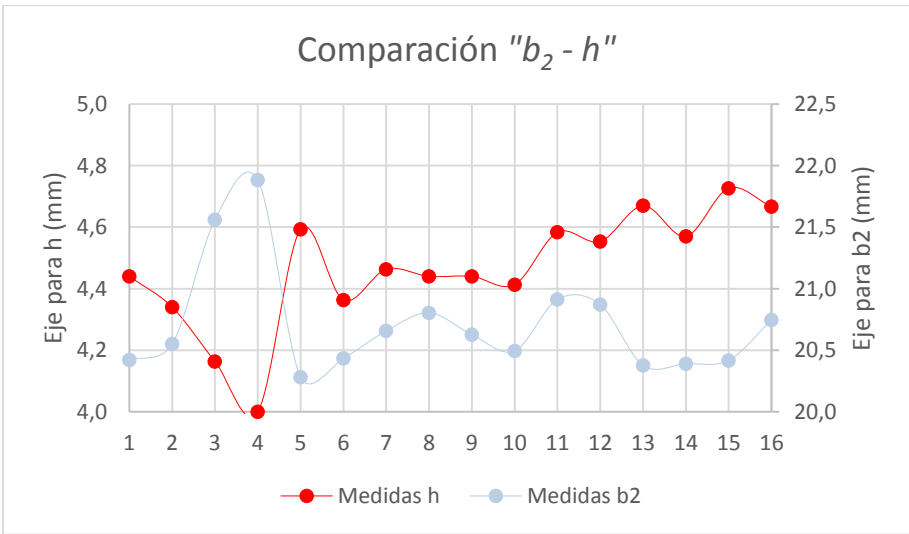


Ilustración 65. Comparación de las medidas de  $h$  y  $b_2$

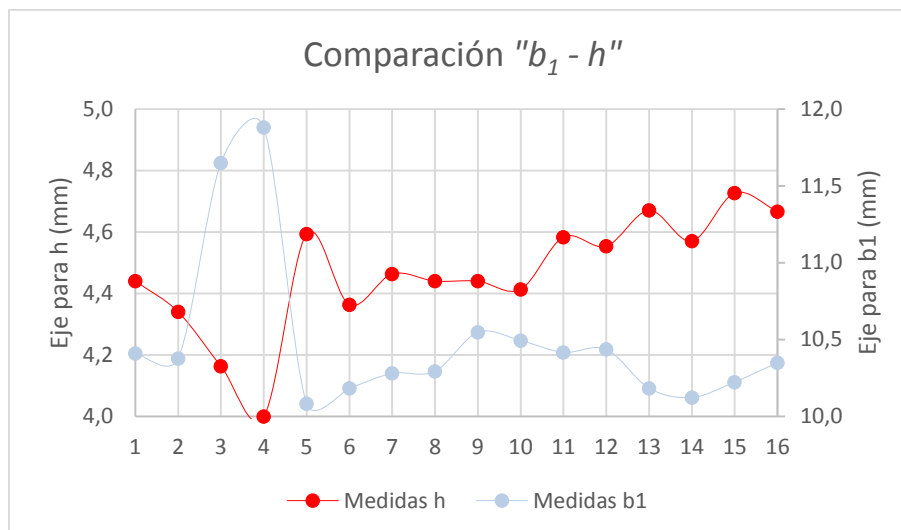


Ilustración 66. Comparación de las medidas de b1 y h

## 4.2 ENSAYOS A TRACCIÓN

La máquina universal de ensayos proporcionaba datos de fuerza y variación de la distancia entre las mordazas. Esos datos fueron importados al programa **MATLAB R2013b** y transformados mediante las ecuaciones del apartado “Cálculo y expresión de los resultados” para poder así expresar en gráficas las curvas esfuerzo-deformación.

En el **ANEXO V** se presentan todas esas curvas con los ejes normalizados. Esto es, se establecieron unos límites tanto para el eje de abscisas como el de ordenadas y se aplicaron por igual a todas las combinaciones para poder apreciar mejor las diferencias y hacer las comparaciones pertinentes. En cada gráfica se representan los tres ensayos llevados a cabo con cada una de las tres probetas fabricadas para cada combinación.

En todas las curvas trazadas se aprecia cómo, al comienzo del ensayo de tracción, aparece una zona que no corresponde a un comportamiento elástico lineal que cabe esperar a esas alturas del ensayo. Esto es debido a que, inicialmente las mordazas de la máquina no están en completa tensión y requiere de un tiempo inicial de establecimiento. Esta zona, si fuese diferente para cada ensayo podría inducir a errores a la hora de comparar todas las curvas. Es por esto que se midió la zona de establecimiento en cada curva y se compararon.

Con la opción “Data cursor” disponible en la interfaz de gráficas de **MATLAB** se seleccionó en cada una de las curvas el punto del eje de abscisas (que representa la deformación unitaria) donde comenzaba el comportamiento lineal esperado (véase Ilustración 67, línea vertical naranja). La media numérica para este punto en todas las gráficas fue de 0,0047 y la desviación estándar de 0,0003. Debido a la ínfima diferencia de este error entre todas las curvas, se decidió considerarlo igual para todas ellas y despreciarlo a la hora de realizar las comparaciones pertinentes.

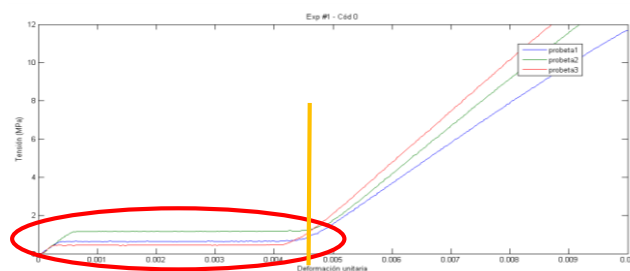


Ilustración 67. Ampliación de la zona de estabilización del ensayo

Con los mismos datos importados en *MATLAB* se generó el **ANEXO VI**, en el cual se presentan las tensiones y deformaciones máximas de cada ensayo y algunos cálculos estadísticos. Para cada combinación experimental, de cada cual se ensayaron tres muestras, se presenta la media en tensión y deformación máxima promedio de las tres muestras, y la desviación estándar entre las mismas.

En la *Ilustración 68* se presenta una de las gráficas generadas, en concreto la que obtuvo mayor valor de tensión (Exp#7). Se puede comprobar que es similar a la curva (c) presentada en la *Ilustración 53* en el apartado de *Equipos y metodologías*. En la gráfica se pueden distinguir zonas diferenciadas que se detallarán a continuación. La primera zona corresponde al anteriormente mencionado establecimiento y debe omitirse.

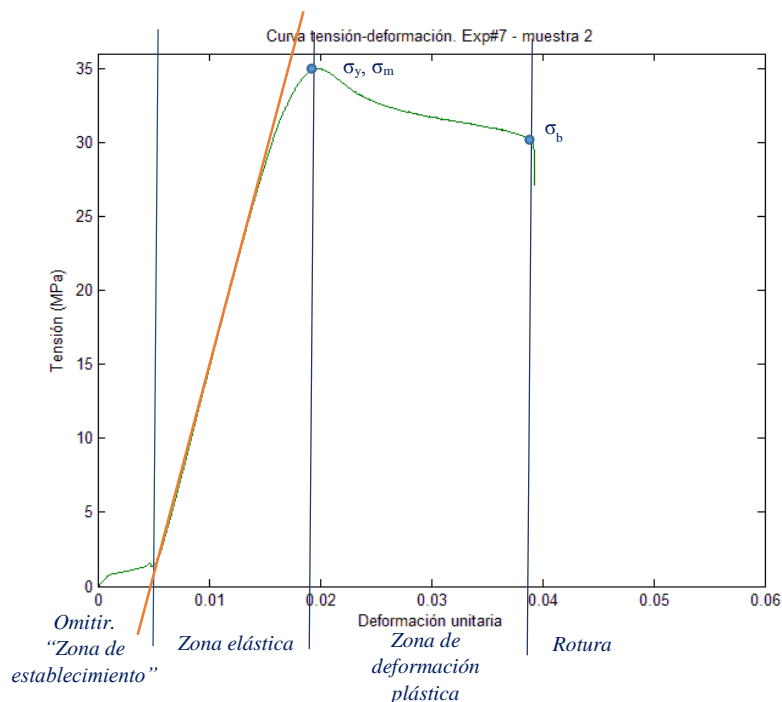


Ilustración 68. Muestra de una de las curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  obtenida en los experimentos

Desde el correcto comienzo de la curva hasta el punto de fluencia el comportamiento es elástico-lineal. En este caso, por la forma de la gráfica, el punto de **esfuerzo a fluencia ( $\sigma_y$ )** coincide con el punto de **resistencia ( $\sigma_m$ )** definido en el apartado 3.2.3.1. La deformación recuperable reversible antes del punto de fluencia, en el intervalo llamado elástico, es fundamentalmente el resultado de la flexión y alargamiento de los enlaces covalentes de la cadena principal del polímero. Esta parte útil de la curva de esfuerzo-deformación puede también comprender el

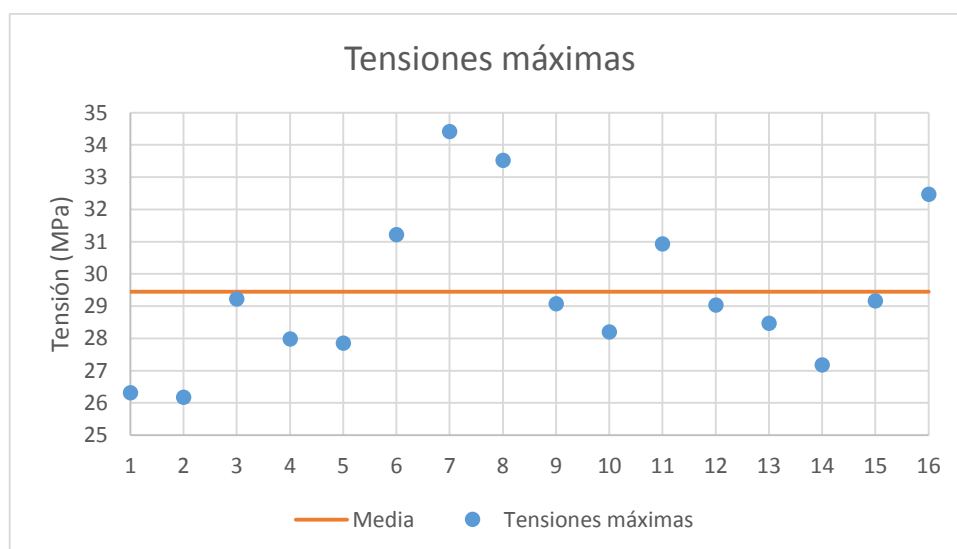
desenrollamiento recuperable de algunas cadenas del polímero. Después del punto de fluencia, el mecanismo predominante es el deslizamiento irreversible de las cadenas de polímero [46]. Este deslizamiento irreversible tiene como resultado una deformación no recuperable, denominada deformación plástica. Si se sigue aplicando tensión, esta deformación aumenta hasta llegar a la rotura del material. La **tensión en el punto de rotura** se designa con  $\sigma_b$ .

Hay que tener en cuenta que la explicación anterior es para polímeros procesados generalmente por inyección. En este caso, hay que tener en cuenta otros factores como el estiramiento o el despegue de los hilos independientes de los que está conformada la probeta, y que se detallarán más adelante.

#### 4.2.1 Resultados de tensión

La tensión máxima obtenida de cada ensayo corresponde al término *resistencia* ( $\sigma_m$ ). A partir de los datos de tensión, se generó el gráfico de dispersión presentado en la *Ilustración 69* donde se representan las tensiones máximas medias de cada combinación experimental (puntos azules) y la media total de todas las muestras (línea naranja), que equivale a un valor de **29,45 MPa**. En un estudio similar a este llevado a cabo en la *Michigan Technological University* (MTU) donde analizan tanto ABS como PLA [47], se obtuvo una tensión media para todas las muestras de PLA de 56,6 MPa, un valor más elevado del aquí obtenido. No obstante, esta media se extrae de ensayos llevados a cabo en muestras fabricadas con diferentes impresoras, a partir de filamentos de diferentes colores y grados de opacidad, y variando la altura de capa y orientación del relleno. En dicho estudio, la tensión media que obtienen para el PLA natural ronda los 35 MPa, un valor próximo al aquí obtenido para algunas de las combinaciones de parámetros de procesado.

Queda patente en el estudio del MTU que las propiedades mecánicas del PLA comercial pueden variar, desde ser un material blando y elástico a un material rígido y con alta resistencia, de acuerdo con diferentes parámetros como la cristalinidad, estructura polimérica, peso molecular, formulación (aleaciones, plastificantes, composites, etc.) u orientación [25]. Es por ello que los datos registrados dependerán mucho del PLA seleccionado en el estudio, pero estos resultados quedan dentro de los valores esperados. En posteriores apartados se analizarán los factores que pueden estar afectando a las propiedades mecánicas de las probetas.

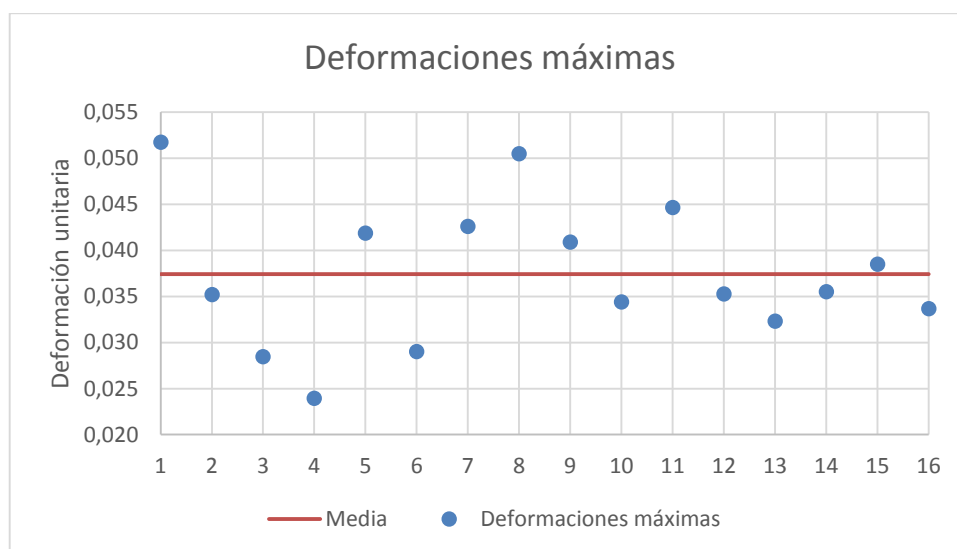


*Ilustración 69. Tensiones máximas medias de cada combinación y media total*

Se puede apreciar claramente en la *Ilustración 69* que las dos combinaciones que presentan una mayor resistencia a tracción son la número 7 y la 8, y las que presentan una menor son la número 1 y 2.

#### 4.2.2 Resultados de deformación

Al igual que con la tensión, se representaron los datos de deformación máxima hasta la rotura total (*Ilustración 70*), es decir, el máximo valor de deformación que aparece en cada ensayo. La media total de todas las deformaciones unitarias es de **0,0374**. En este caso, este dato no corresponde con ningún término de los definidos en el *apartado 3.2.3.1*. Como se comentará más adelante, la rotura se producía de un modo gradual y no era fácil y fiable extraer el dato exacto de **deformación en el punto de rotura ( $\epsilon_b$ )** (sólo se puede extraer a partir de las gráficas mediante el criterio de un observador, sometido a factor de error humano). Sin embargo la deformación máxima hasta la rotura total era un parámetro fácil de extraer con MATLAB. Por ello, como la pendiente tras la rotura en casi todas las gráficas es casi vertical, se decidió extraer el dato de deformación máxima.



*Ilustración 70. Deformaciones máximas medias de cada combinación y media total*

Debido a los datos de deformación extraídos, existen dudas sobre si los ensayos llevados a cabo a las probetas pertenecientes a la combinación número 1 fueron correctos. Si observamos las curvas esfuerzo-deformación de esta combinación (*Ilustración 71*) vemos, en la curva de la probeta 1 más claramente, que no hay un punto de rotura claro, sino que la curva va descendiendo progresivamente, variando la pendiente en determinados puntos. Esto se debe a que la probeta se fue estirando y deshilachando, y algunos hilos se van rompiendo mientras que otros siguen soportando tensión. Esto verá más adelante claramente en las capturas del microscopio estereoscópico. Si comparamos esta gráfica con las demás (en el **ANEXO V**) vemos que esta es la única en la que se han producido efectos de este tipo, por lo que se creyó conveniente menospreciar sus resultados, especialmente los referidos a la deformación. Como vemos en la *Ilustración 70*, este efecto provocó que esta combinación sea la que haya obtenido mayores valores de deformación.

Aparte de los resultados extraídos del experimento 1, en general los datos de deformación presentan bastante variabilidad (ver gráficas). Es por esto que se presenta complicado sacar conclusiones coherentes a partir de estos datos.



Según el estudio del MTU [47], las deformaciones máximas de las piezas ensayadas de PLA tenían valores de en torno al 0,019 (mm/mm). En el caso del presente estudio el valor medio obtenido resultó casi el doble. De nuevo cabe mencionar que estos valores dependerán del tipo de PLA empleado y de las condiciones de procesado. Aunque estos datos no son del todo comparables, sirven para tener una referencia.

Pese a que los valores de deformación en un principio se desean que sean lo más elevados posibles (siempre combinado con un elevado valor para la tensión), en este caso una deformación elevada puede ser debida a un efecto de levador de tijera (como se comenta en el apartado 0) si las capas o las fibras no están bien unidas entre sí. Es por ello que los resultados de deformación son difíciles de interpretar. Por ejemplo, las mejores combinaciones para obtener buenos datos de resistencia resultaron ser la 7 y la 8 que además presentan buenos resultados de deformación. La combinación de factores número 2 resultó, de forma inversa, una de las combinaciones que peores resultados de tensión dio, coincidiendo con los peores resultados de deformación. Sin embargo, la combinación de resultados 1, dio malos resultados en la resistencia, pero sin embargo presenta una de las mejores deformaciones. Como ya se comentó, estas probetas presentaron deshilachamiento lo cual explica tanto la baja resistencia como los resultados de deformación.

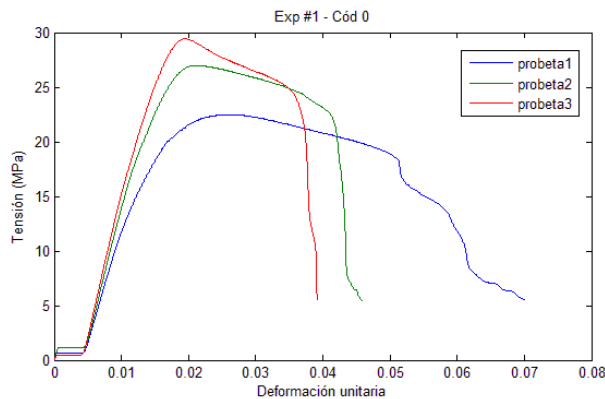


Ilustración 71. Curvas esfuerzo-deformación de las muestras del Exp#1

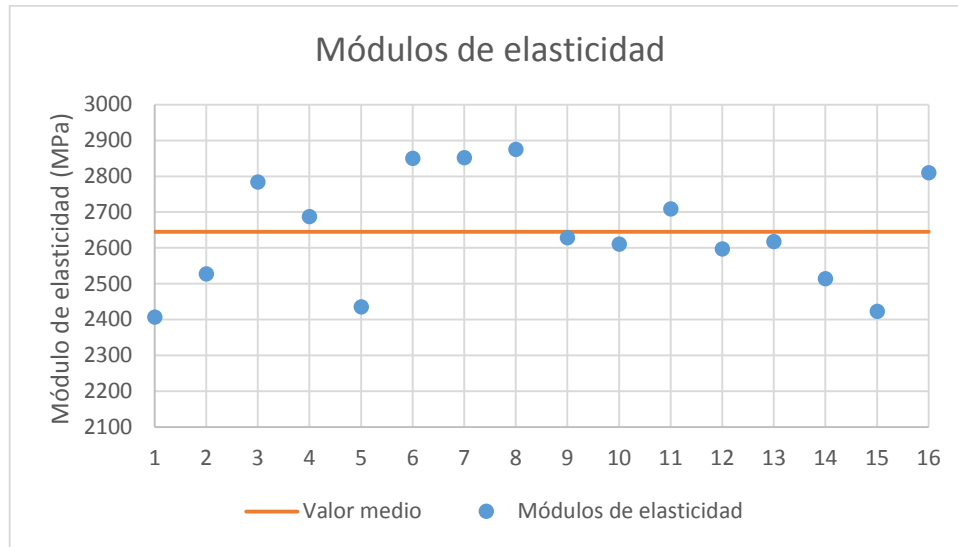
#### 4.2.3 Módulos de elasticidad

El último dato calculado a partir de las curvas tensión-deformación es el módulo de elasticidad en tracción para cada una de las muestras. El método de cálculo de la pendiente secante se detalló en el apartado de *Cálculo y expresión de los resultados* y los puntos de la gráfica se seleccionaron nuevamente con la opción “Data cursor” de MATLAB. En la *Tabla 18* se presentan los valores medios de los módulos para cada conjunto experimental de tres muestras, y la desviación estándar entre las tres. El valor medio de todas las muestras resultó **2,65 GPa**. En el anteriormente citado estudio [47], el módulo de elasticidad medio para todas las muestras es de 3,37 GPa. No se proporciona el dato únicamente extraído de las muestras de PLA natural.

Núm. exp.	1	2	3	4	5	6	7	8
E (GPa)	2,41	2,53	2,78	2,69	2,43	2,85	2,85	2,87
D.S. (GPa)	0,32	0,31	0,04	0,01	0,17	0,00	0,04	0,02
Núm. exp.	9	10	11	12	13	14	15	16
E (GPa)	2,63	2,61	2,71	2,60	2,62	2,51	2,42	2,81
D.S. (GPa)	0,12	0,12	0,13	0,15	0,11	0,12	0,10	0,05

Tabla 18. Módulos de elasticidad para cada combinación

Los mismos datos se representan en el gráfico de dispersión de la *Ilustración 72* para facilitar el análisis y comparación de los mismos.

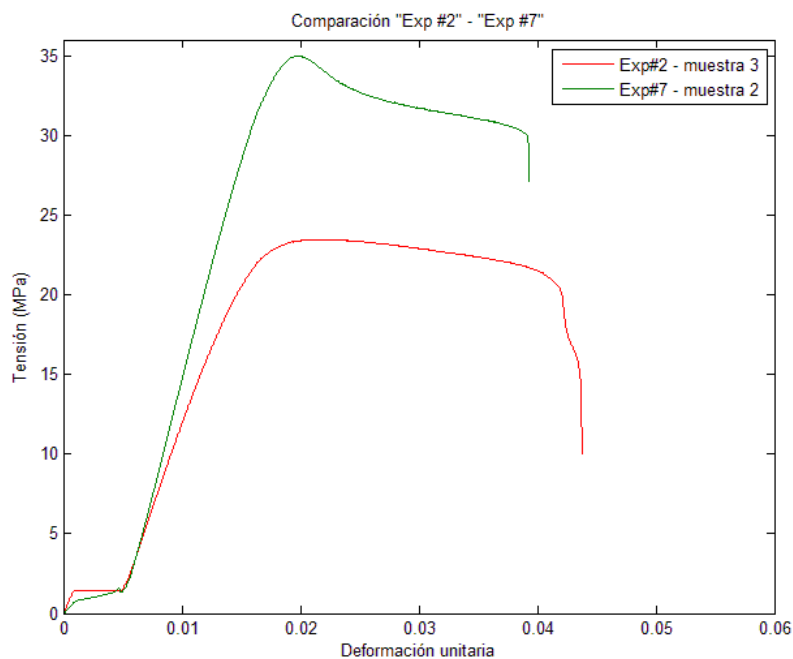


*Ilustración 72. Dispersión de los módulos de elasticidad calculados*

Una vez más, los mejores resultados del módulo de elasticidad coinciden con las combinaciones de factores 7 y 8. Comparando todos los resultados tanto de resistencia, deformación y modulo elástico, se puede concluir que estas combinaciones de factores son las mejores. En posteriores apartados se analizarán como influyen los factores individuales en estos resultados.

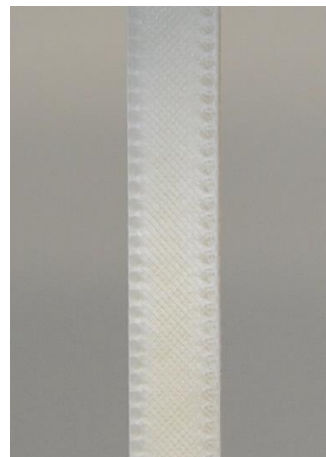
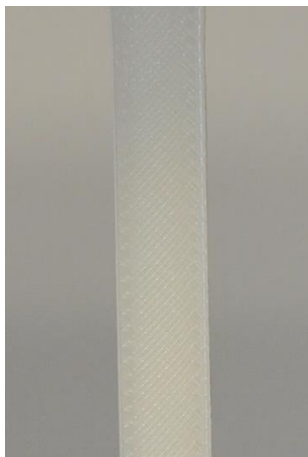
#### 4.2.4 Apreciaciones

Como se ha citado anteriormente, las combinaciones que presentan menor y mayor resistencia, son la número 2 y 7, respectivamente. En la *Ilustración 73* se representan una curva de cada combinación para poder contemplar las diferencias entre las mismas.



*Ilustración 73. Curvas de las probetas que aguantaron mayor y menor tensión máxima*

Aparte de los datos numéricos, se pueden extraer más apreciaciones a partir del ensayo a tracción. Si se observan la *Ilustración 74* e *Ilustración 75*, que corresponden a una probeta al inicio del ensayo y la misma justo antes de romper, respectivamente, se ven claras diferencias en su apariencia. La probeta, a medida que aumenta la tensión aplicada va volviéndose de un color más blanco, y la unión de sus fibras en los lados se va separando.

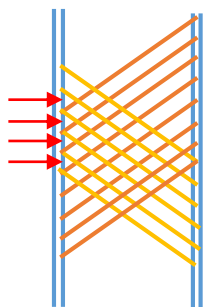


*Ilustración 74. Probeta al inicio del ensayo    Ilustración 75. Probeta justo antes de romper*

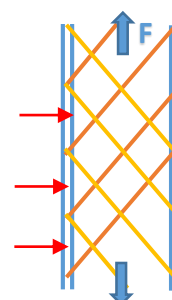
Ambas ilustraciones corresponden a una muestra de la combinación número 9. Para ver uno de los ensayos a tracción en la plataforma *YouTube*, ir al apartado 3.2.3.1.

En el esquema representado en la *Ilustración 76* se ve porqué han podido surgir esas marcas en los laterales de la zona central de la probeta. Si atendemos al modo de fabricación de la máquina que se configuró en *Slic3r*, primero se definen dos perímetros para cada capa (líneas azules) y luego se rellena esa capa con hilos a 45° siempre en la misma dirección (líneas amarillas). La capa consecutiva se hará definiendo al igual primero los perímetros, y luego aplicando una capa con los hilos a 45°, pero en dirección opuesta a la capa anterior (líneas naranjas), y así cíclicamente.

Esto provoca que en los perímetros se unan los extremos de los hilos de cada capa, y quedan zonas (señaladas por las flechas rojas) donde la deposición de material es ínfimamente menor y no se comprime tanto, por lo que la cohesión de los hilos en esas zonas puede verse afectada.



*Ilustración 76. Esquema de la estructura de hilos en la probeta*  
**\*Nota:** las líneas en la realidad son equidistantes, y al configurar el relleno al 100% están separadas teóricamente por distancia nula.



*Ilustración 77. Esquema aplicando una fuerza de tracción*

Al aplicar una fuerza de tracción (*Ilustración 77*), es probable que la disposición de los hilos propicie un estiramiento semejante al que se produce en un elevador de tijera, y la plastificación sea diferente dependiendo de la zona, apareciendo así marcas en los laterales.

### 4.3 ANÁLISIS FACTORIAL

A partir de los datos obtenidos de tensión, se calcula una respuesta de tensión para cada combinación calculando la media entre las tres muestras. Con esas respuestas, se puede calcular el valor de cada efecto siguiendo el razonamiento planteado en la *Tabla 12* del apartado de metodologías. Los resultados se muestran en la *Tabla 19*.

Efectos		Valor
<b>promedio</b>	$b_0$	29,4485
<b>A: Ventilador</b>	$b_a$	0,0447
<b>B: Velocidad</b>	$b_b$	2,7820
<b>C: T-bed</b>	$b_c$	2,1689
<b>D: T-nozzle</b>	$b_d$	-0,2731
<b>AB</b>	$b_{ab}$	-0,2257
<b>AC</b>	$b_{ac}$	1,0782
<b>AD</b>	$b_{ad}$	-0,2341
<b>BC</b>	$b_{bc}$	0,9319
<b>BD</b>	$b_{bd}$	-0,6109
<b>CD</b>	$b_{cd}$	-2,1581
<b>ABC</b>	$b_{abc}$	0,3089
<b>ABD</b>	$b_{abd}$	1,1153
<b>ACD</b>	$b_{acd}$	0,1165
<b>BCD</b>	$b_{bcd}$	-0,1050

Tabla 19. Efectos medidos a partir de los datos de tensión

Estos datos se pueden representar en un diagrama de Pareto estandarizado para facilitar su análisis (*Ilustración 78*).

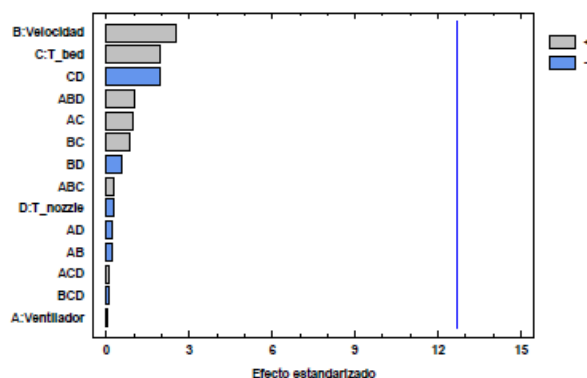


Ilustración 78. Diagrama de Pareto estandarizado para la tensión máxima

Como se puede apreciar, hay dos efectos principales que predominan en la respuesta a tensión: la velocidad de impresión y la temperatura de la cama de impresión. Que el valor del efecto sea positivo quiere decir que es preferible escoger su valor alto del dominio experimental, es decir: 60 mm/s y 70 °C, respectivamente. El efecto principal del ventilador tiene el valor más bajo de todos los efectos, por lo cual su influencia se puede suponer casi nula, pero también es positiva.

Por otro lado, el efecto principal de la temperatura del *nozzle* es negativo, pero muy bajo, y por lo tanto poco influyente. No obstante, expresa que es preferible establecer este valor en su nivel inferior (195 °C).

La diferente influencia de cada efecto principal en la tensión se pone de manifiesto en las siguientes gráficas (Ilustración 79 a Ilustración 82). En ellas se ha calculado la media entre todas las combinaciones que tienen en común cada factor en su nivel inferior (barras azules) y su nivel superior (barras rojas); las barras de error representan la desviación estándar de cada conjunto de datos.

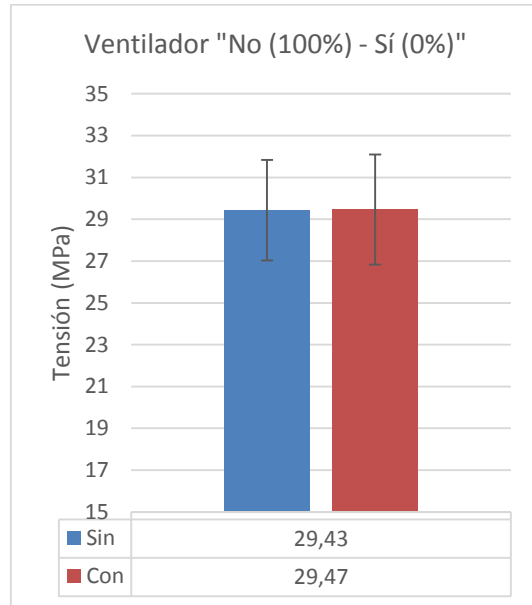


Ilustración 79. Tensión media sin y con ventilador

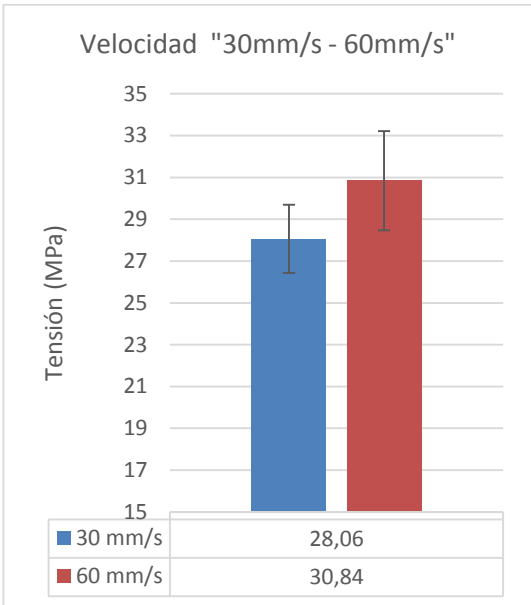


Ilustración 80. Tensión media a 30 y 60 mm/s

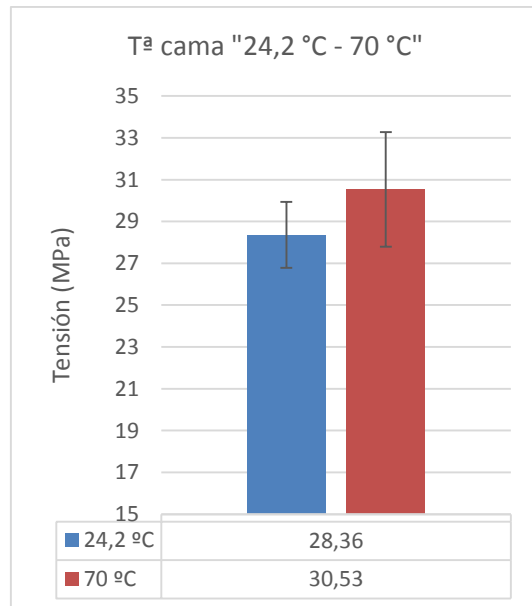


Ilustración 81. Tensión media. Cama a 24,2 y 70 °C

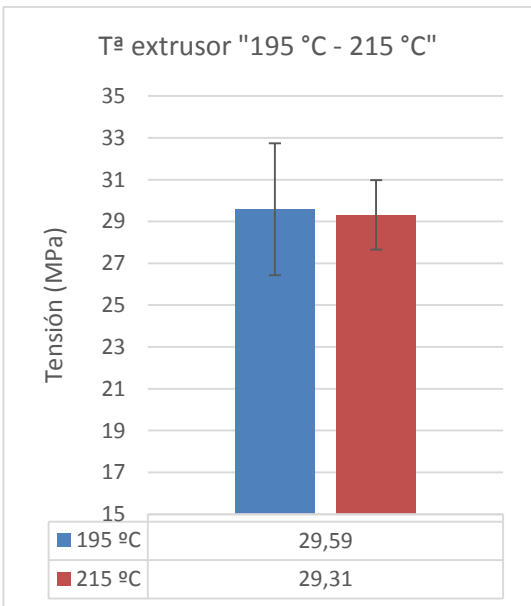


Ilustración 82. Tensión media. Nozzle a 195 y 215 °C

Como se puede apreciar, la diferencia que hay entre las medias varía dependiendo del valor del efecto. El factor al que se le asocia un efecto principal con mayor valor, la velocidad de impresión (2,7820), se corresponde con la mayor diferencia en la media de tensión (nivel alto – nivel bajo = 2,78 MPa). El segundo con mayor diferencia entre sus medias es la temperatura de la cama (2,17 MPa), también con el segundo valor más alto en el efecto (2,1689). Siguiendo con los valores (absolutos) de los efectos principales, le sigue de lejos el asociado a la temperatura del

extrusor ( $-0,2731$ ), y vemos que la diferencia entre las tensiones medias es ( $-0,28$  MPa), de igual signo que el valor del efecto y casi 2 MPa más baja en valor absoluto que la diferencia en la temperatura de la cama. Por último, se aprecia una diferencia ínfima entre las tensiones medias del ventilador (0,04 MPa), que corresponde a su bajo valor de efecto (0,0447), el valor más bajo de todos los efectos, tanto principales como secundarios. Se sospecha que la razón por la que el ventilador ha tenido un efecto tan bajo es por su baja potencia. Se trataba de un ventilador *brushless* de 40x40mm y 12V acoplado a una tobera impresa en ABS. Es probable que parte del flujo de aire que generaba se perdiera por posibles fugas en la tobera, o su orientación a la última capa no fuera la adecuada, por lo cual no la enfriaría correctamente.

Observando sólo los efectos principales, las mejores condiciones de impresión (dentro de nuestro dominio experimental) para mejorar la tensión máxima que soporta la probeta serían las mostradas en la *Tabla 20*.

Ventilador	100%
Velocidad de impresión	60 mm/s
Temperatura de la cama	70 °C
Temperatura del extrusor	195 °C

*Tabla 20. Condiciones mejores teniendo sólo en cuenta efectos principales*

Si se comprueba la *Matriz de experimentos y plan de experimentación*, se ve que estos valores corresponden al experimento número 8, el cual obtuvo el segundo valor máximo de tensión, después del número 7 (igual que el 8 pero sin ventilador; se reitera la poca influencia de este factor). Por esto vemos que los efectos principales nos dan una información encaminada.

Sin embargo, esta interpretación se debe matizar al considerar las interacciones. En el diagrama de Pareto se observa que la interacción CD (las temperaturas de cama y extrusor) tiene un valor considerable. Si se toman del plan de experimentación estos factores y se dividen en bloques, tal que el factor D quede constante, y el C varíe, se puede observar lo siguiente (*Tabla 21*).

N°Exp	Factores C y D		Respuesta		
	$T_{bed}$ (°C)	$T_{nozzle}$ (°C)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\sigma_{media}$ (MPa)	D.S. (Mpa)
1	24,2	195	26,31	27,42	1,45
2	24,2	195	26,18		
3	24,2	195	29,22		
4	24,2	195	27,98		
5	70	195	27,85	31,75	2,93
6	70	195	31,22		
7	70	195	34,41		
8	70	195	33,52		
9	24,2	215	29,07	29,31	1,15
10	24,2	215	28,20		
11	24,2	215	30,93		
12	24,2	215	29,03		
13	70	215	28,46	29,32	2,26
14	70	215	27,17		
15	70	215	29,16		
16	70	215	32,47		

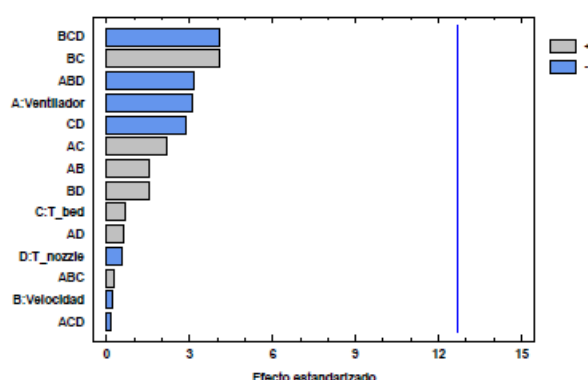
*Tabla 21. Interacción CD entre los factores de temperatura de cama y nozzle*

Si la temperatura del extrusor permanece constante a 195 °C, y se varía la temperatura de la cama de 24,2 °C (temperatura ambiente) a 70°C, la tensión media pasa de 27,42 a 31,75 MPa (un incremento del 15,8%). Sin embargo, si se hace este mismo cambio en la temperatura de la cama, pero mantenido constante la del extrusor a 215 °C, el incremento que se produce en la tensión media (0,03%) es despreciable. Esto quiere decir que el efecto que provoca variar un factor depende del nivel al que se encuentre el otro.

Como objeción, es cierto que si tenemos en cuenta las desviaciones estándar, en algunos casos, estos resultados de tensión se solapan. No obstante, hay que tener en cuenta que estos factores intervienen en más interacciones.

Por último, en la *Tabla 21* volvemos a ver que la combinación que mejor resultados da es con la cama calefactada a 70 °C y el *nozzle* a su nivel bajo (195 °C). Esto puede deberse a la adhesión entre las capas favorecida por la cama a una temperatura cercana a la de transición vítrea del PLA y la posible degradación del filamento en el extrusor. Estos efectos se comentarán con más detalle en los resultados de los análisis térmicos. A su vez, dentro de este grupo, los resultados mejoran con la velocidad de impresión en su nivel alto (60 mm/s), en los experimentos núm. 7 y 8. Ya se ha comentado que la velocidad de impresión influye en el tiempo de enfriamiento entre la deposición de capas, y por tanto en la eficacia con la que las capas pegan entre sí.

En cuanto al análisis factorial de deformaciones, en la *Ilustración 83* se muestra el diagrama de Pareto estandarizado de los efectos.



*Ilustración 83. Diagrama de Pareto estandarizado para las deformaciones máximas*

Como se puede apreciar, predominan los efectos de tres y dos factores. Sólo un efecto principal tiene un efecto notable, y es el ventilador, que era el efecto más bajo en el análisis de tensiones. Esto está indicando que no hay ningún factor que influya de manera determinante en las deformaciones y que es el efecto conjunto de factores el que predomina. Igualmente lleva a la conclusión de que la variabilidad de resultados en las deformaciones puede estar provocando un análisis factorial con un factor de error muy elevado del que no se pueden extraer conclusiones fiables. Al disponer sólo de tres muestras por combinación, el descarte de aquellas con una desviación elevada no era posible. En un principio, ante unos cálculos iniciales del material y medios disponibles, se consideraron tres muestras como un número válido para la reproducibilidad de los resultados. Sin embargo queda patente que son necesarios más ensayos para tener un valor fiable de la deformación. Pese a que se planteó la impresión de más probetas, se tuvieron problemas con conseguir PLA del mismo proveedor para fabricarlas, por lo que se desestimó esta opción.

## 4.4 MEDIDAS DE LA DENSIDAD

### 4.4.1 Picnometría de Helio

Tras medir las densidades de las dos primeras muestras, se procedió a medir la densidad del filamento de partida. Se esperaba que las probetas mostraran una densidad ligeramente inferior al filamento, ya que, al estar fabricadas por hilos entrecruzados extruidos a partir de este material, la posibilidad de que no quedara una pieza completamente maciza y libre de porosidades era alta.

Número experimento	1	2	Filamento	Filamento'
Peso muestra (g)	1,83	2,16	1,96	1,96
Temperatura (°C)	29,2	29,4	29,5	29,7
Volumen promedio (cm <sup>3</sup> )	1,45	1,70	1,56	1,57
Densidad promedio (g/cm <sup>3</sup> )	<b>1,266</b>	<b>1,269</b>	<b>1,253</b>	<b>1,249</b>

Tabla 22. Resultados obtenidos con el picnómetro

Tras realizar los experimentos anteriormente mencionados, y reflejados en la *Tabla 22* se vio que no se obtenían resultados convincentes (se repitió, por si acaso, la medida del filamento). El Helio penetra muy bien incluso en pequeñas porosidades. Si la porosidad de la pieza está interconectada, la medida de densidad obtenida debería ser muy similar a la del filamento. Que esta sea mayor plantea muchas dudas sobre si la medida está bien hecha. Por ello, se procedió a repetir todas las medidas por el método de Arquímedes.

### 4.4.2 Método de Arquímedes

Los resultados obtenidos mediante el método de Arquímedes se presentan en la *Tabla 23*. El motivo por el cual hay un dato denominado  $m_{\text{sumergido inicial}}$  y otro  $m_{\text{sumergido final}}$  es porque se comprobó que dejando las muestras un tiempo en reposo sobre la balanza, la medida de la masa se veía ligeramente incrementada. Por ello se dejó en reposo cada muestra una media de tres minutos sobre la bandeja sumergida de la balanza, hasta que la medida quedaba estable.

Como se observa en la *Tabla 23*, el incremento de la masa sumergida es ínfimo, con una media de 0,5 mg y una desviación típica de 0,46 mg, siendo únicamente las muestras correspondientes a los experimento número 2, 3 y 16 las que presentan un aumento mayor o igual a 1 mg. La densidad se calculó empleando el dato de  $m_{\text{sumergido final}}$ .

Núm. experimento	1	2	3	4	5	6	7	8
$m_{\text{aire}}$ (g)	1,6710	1,2117	1,9427	1,1495	1,3349	1,3452	1,2996	1,6682
$m_{\text{sumergido inicial}}$ (g)	0,1690	0,1128	0,3025	0,1775	0,1297	0,1423	0,1948	0,2042
$m_{\text{sumergido final}}$ (g)	0,1696	0,1138	0,3042	0,1784	0,1298	0,1426	0,1953	0,2049
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	<b>1,11</b>	<b>1,10</b>	<b>1,18</b>	<b>1,18</b>	<b>1,10</b>	<b>1,12</b>	<b>1,17</b>	<b>1,14</b>
Código experimento	9	10	11	12	13	14	15	16
$m_{\text{aire}}$ (g)	1,1255	1,2621	1,2025	1,2689	1,1612	1,2145	1,2332	1,5304
$m_{\text{sumergido inicial}}$ (g)	0,1683	0,1619	0,1041	0,1347	0,1049	0,1200	0,1636	0,2345
$m_{\text{sumergido final}}$ (g)	0,1687	0,1620	0,1047	0,1348	0,1049	0,1201	0,1639	0,2355
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	<b>1,17</b>	<b>1,14</b>	<b>1,09</b>	<b>1,12</b>	<b>1,10</b>	<b>1,11</b>	<b>1,15</b>	<b>1,18</b>

Tabla 23. Densidad de las muestras por el método de Arquímedes



Se midió del mismo modo la densidad del filamento de PLA empleado (Tabla 24). En primer lugar, si comparamos esta medida con el dato proporcionado por el fabricante (Tabla 6), vemos que la densidad es la misma. Sin embargo, el dato del fabricante corresponde a los pellets de PLA puro antes de ser transformados en filamento por un intermediario. De esto podemos concluir que la carga de sustancias que adicionó este intermediario a los pellets para favorecer su procesado (o posibles cuestiones económicas) no pudo ser muy elevada, ya que sino la densidad muy probablemente hubiera variado apreciablemente.

	FILAMENTO
$m_{aire} \text{ (g)}$	1,6641
$m_{sumergido \text{ final}} \text{ (g)}$	0,3227
$\rho_{final} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	<b>1,24</b>

Tabla 24. Densidad del filamento de PLA de partida

En la Ilustración 84 se representan en un gráfico la dispersión de las medidas de densidad (puntos azules) y la media de todas ellas (línea naranja), que corresponde a un valor de **1,1352 g**. Asimismo se representa la densidad del filamento de partida que, como puede apreciarse, es mayor en todos los casos.

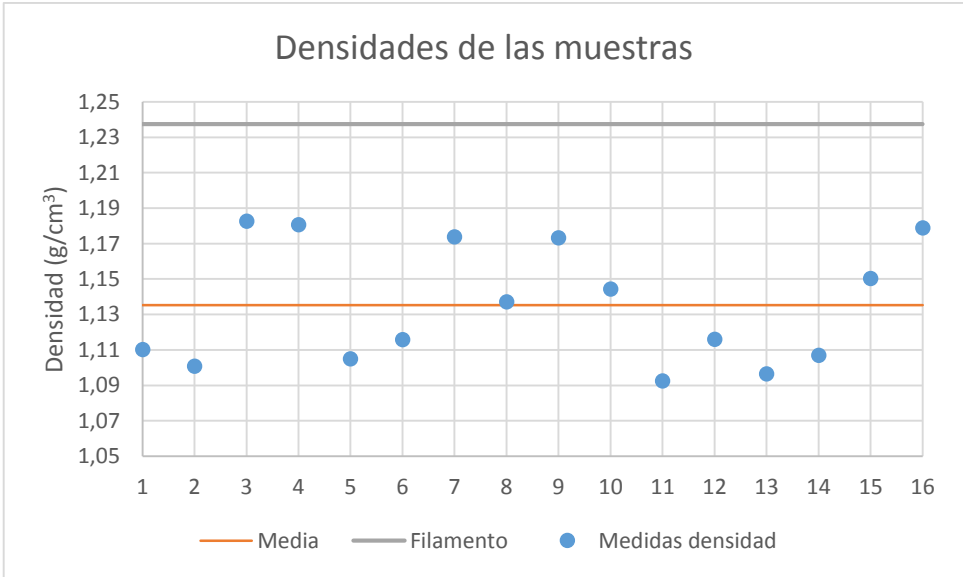


Ilustración 84. Densidades de las muestras por el método de Arquímedes

Una vez más, se puede hacer una apreciación sobre los resultados de los experimentos número 3 y 4. Se ve que son las muestras más densas, por lo que se concluye que la compresión que han sufrido al tener el *nozzle* inicialmente más cerca de la base de impresión ha tenido efectos sobre su densidad.

A pesar de la minúscula magnitud del incremento del valor de  $m_{sumergido}$  para las diferentes muestras, cabía la posibilidad de una posible variación del grado de porosidad de las mismas. Por ello, se decidió lacar algunas de ellas (las que habían presentado menor y mayor resistencia a tracción, respectivamente) y repetir la medida para comprobar si se observaban diferencias.

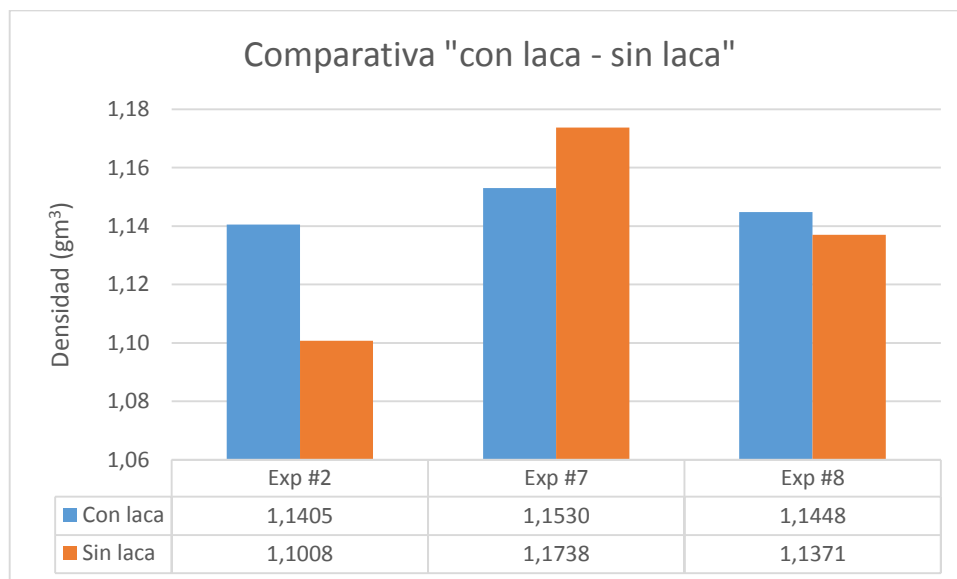
Si se impermeabiliza la superficie de la muestra (con la laca), el agua no penetrará al interior de la misma por posibles poros que alcanzasen su superficie, por lo que la masa sumergida no se debería ver incrementada y se obtendrá la densidad real de la muestra. Es decir, si existe

porosidad, previsiblemente la densidad de la muestra impermeabilizada con laca será menor que sin ella.

A continuación se presentan estos resultados en la *Tabla 25*.

Núm. experimento	2	7	8
$m_{\text{aire sin laca}} \text{ (g)}$	0,9487	1,2132	1,2053
$m_{\text{aire con laca}} \text{ (g)}$	0,9811	1,2331	1,2263
$m_{\text{sumergida}} \text{ (g)}$	0,1245	0,1671	0,1587
$\rho \text{ (g/cm}^3\text{)}$	<b>1,14</b>	<b>1,15</b>	<b>1,14</b>

*Tabla 25. Densidades de algunas muestras (recubiertas con laca)*



*Ilustración 85. Comparativa entre las medidas realizadas con laca o sin laca*

Como se aprecia en el gráfico de barras (*Ilustración 85*) la medida con laca en los experimentos número 2 y 8 presenta una densidad ligeramente superior a la medida con laca, por lo que los resultados no son concluyentes. Se atribuye esta pequeña diferencia a la variación del tamaño de las muestras entre las medidas sin y con laca y al factor de error humano.

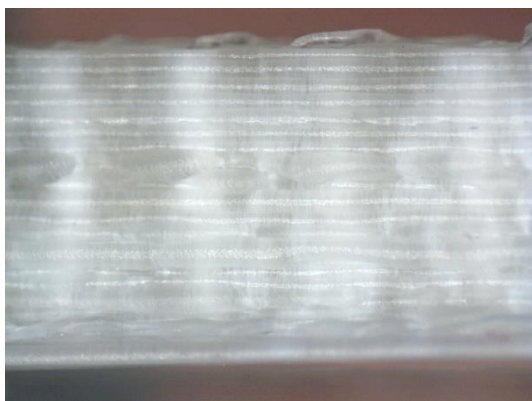
#### 4.5 MICROSCOPÍA ESTEREOSCÓPICA

En el **ANEXO VII** se presentan capturas de cada muestra tomadas al microscopio estereoscópico desde diferentes perspectivas.

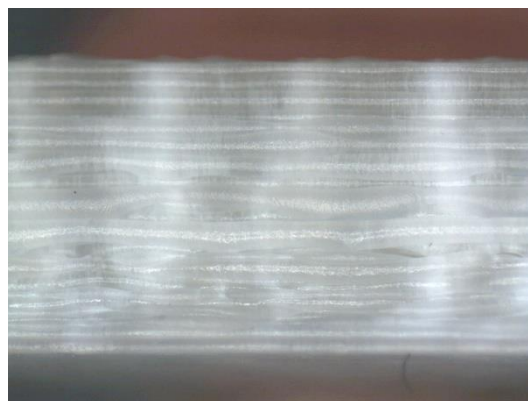
Respecto del experimento número 1, como ya se comentó en los resultados del ensayo a tracción, las probetas no se llegaron a romper del todo, sino que sufrieron una deformación muy elevada, los hilos entrecruzados de PLA se deshilaron y no produjo fractura como en el resto de combinaciones. Esto se aprecia claramente en las capturas del microscopio estereoscópico (ver **ANEXO VII**).

Como se introdujo en el apartado 4.1 *Dimensiones de las probetas y análisis visual*, si en el **ANEXO VII** se comparan las *Imágenes laterales de la zona próxima a la fractura*, se verá que las capturas correspondientes a los experimentos número 3 y 4 (*Ilustración 86 e Ilustración 87*) presentan una apariencia bastante peor que el resto de las muestras. Se muestran capturas de

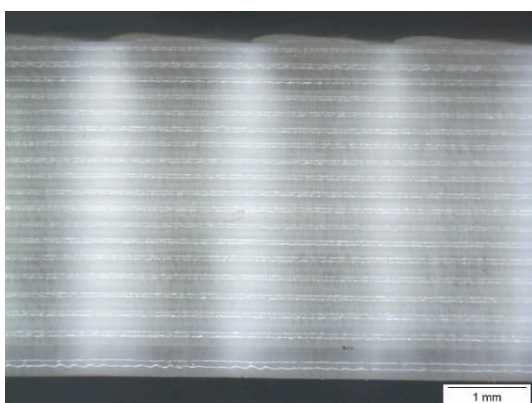
los experimentos número 6 y 12 (*Ilustración 88 e Ilustración 89*) para comparar. En estas dos últimas imágenes se puede ver como las distintas capas están paralelas unas con otras. La escala aplicable a todas las imágenes es 1 mm ya que todas las capturas se tomaron con el mismo aumento.



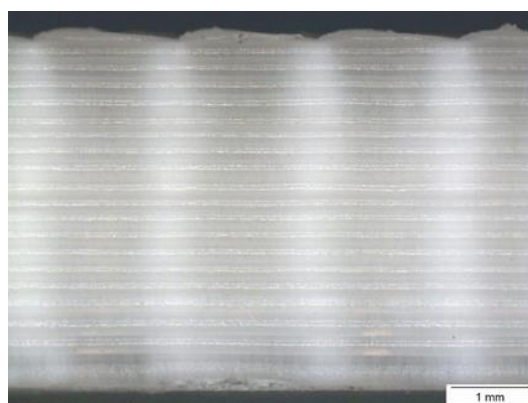
*Ilustración 86. Captura lateral Exp#3*



*Ilustración 87. Captura lateral Exp#4*



*Ilustración 88. Captura lateral Exp#6*



*Ilustración 89. Captura lateral Exp#12*

En las impresiones de estas dos combinaciones experimentales (núm. 3 y 4), el *nozzle* estaba tocando la cama de impresión y se formaron surcos en la primera base que provocaron que las consecutivas capas no fueran completamente lisas y estuvieran bien apiladas. También se ve que el efecto se va mitigando a medida que crece la altura de la pieza. Hay que tener en cuenta que estas probetas tenían una altura de impresión en el eje Z de tan sólo 4 mm. En una pieza más alta, este efecto se hubiera paliado aún más y sólo se notaría en sus primeras capas.

Por otro lado, estas dos combinaciones no fueron las únicas en las que el *nozzle* estaba tocando la base de impresión. Sin embargo, si se observa la “*Tabla 11. Matriz de experimentos y plan de experimentación*”, vemos que las dos combinaciones fueron impresas sin calentar la base de impresión. Esto hace que esos surcos formados solidifiquen rápidamente y se propicia la propagación de este error. En las combinaciones donde surgió este problema pero la impresión se realizó con la base a 70°C, las primeras capas se mantenían cerca de la temperatura de transición vítrea del PLA, por lo que esos surcos se “aplastaban” fácilmente por el *nozzle* al imprimir las capas consecutivas y los efectos negativos se notaban menos.

Se aprecia también en las imágenes la variación en la altura de las piezas, que se ve afectada por la distancia inicial del *nozzle* a la base de impresión. Esto ya se comentó en el apartado de dimensiones.

Por último, en las imágenes laterales de las probetas ensayadas se aprecian muy bien las marcas de un blanco más claro de las que se habló en el apartado de los ensayos a tracción.

Si ahora nos fijamos en el **ANEXO VII** en las imágenes de planta, tanto superior como inferior, podemos distinguir diferentes modos de fractura. En las tres siguientes capturas se muestran algunos ejemplos (*Ilustración 90 a Ilustración 92*). La escala aplicable a todas las imágenes es 2 mm.



*Ilustración 90. Planta sup. Exp#6*

*Ilustración 91. Planta sup. Exp#7*

*Ilustración 92. Planta sup. Exp #9*

En la captura del Exp#6 se ve cómo la fractura se ha propagado a  $45^\circ$ , siguiendo la dirección a la que están depositadas las fibras. En los perímetros, la fractura es plana.

En el Exp#7 se ve como la fractura es prácticamente plana, aunque se vea un pequeño entrante en la zona central. Esta muestra se analizará con más detalle al microscopio electrónico de barrido.

Por último, si se observa el Exp#9, se aprecia una fractura plana, pero se ven varios picos que coinciden con roturas de las fibras orientadas a  $-45^\circ$ .

#### 4.6 MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

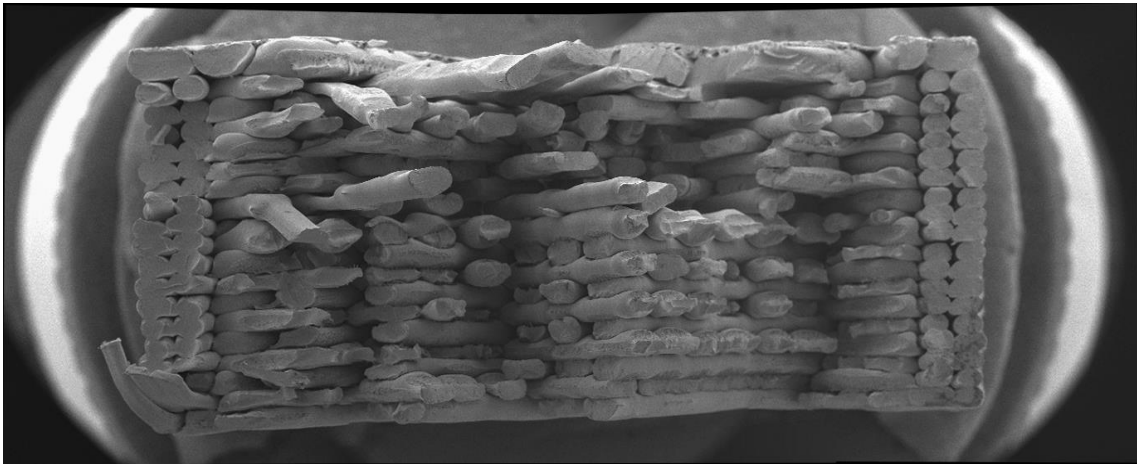
Como se comentó en el apartado de *Equipos y metodologías*, se prepararon dos muestras para su análisis al SEM. Estas muestras fueron las que habían presentado menor y mayor resistencia a tracción, número 2 y 7, respectivamente.

La mínima ampliación que permite el SEM no abarca toda el área de fractura de la probeta, por lo que se hizo una captura de cada zona para posteriormente, mediante un software de composición de imágenes<sup>12</sup>, unir las para formar una panorámica y apreciar mejor toda superficie.

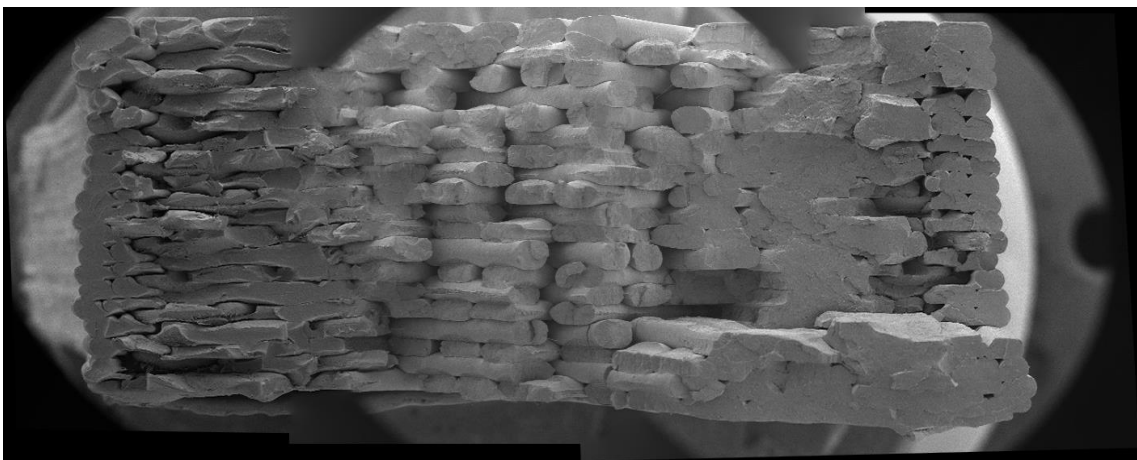
La *Ilustración 93* es la panorámica de una de las muestras de la combinación experimental número 2. Como se puede apreciar, no se nota que la imagen está compuesta a partir de varias imágenes. No se puede decir lo mismo de la *Ilustración 94*, donde la unión de las imágenes no ha quedado perfecta. No obstante, sí es lo suficientemente buena como para apreciar la superficie completa de fractura.

---

<sup>12</sup> <http://research.microsoft.com/en-us/um/redmond/groups/ivm/ice/>



*Ilustración 93. Panorámica frontal del área de fractura Exp#2*



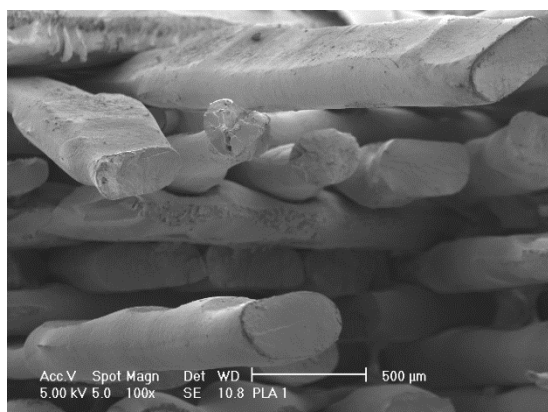
*Ilustración 94. Panorámica frontal del área de fractura Exp#7*

Se aprecian claramente diferencias entre las dos imágenes. Antes de empezar a comentar estas diferencias, vemos que en ambas áreas se aprecian dos zonas bien diferenciadas (sobre todo en la captura del Exp#2). Por un lado están los lados, donde se ven los dos perímetros, y por otro lado la zona central, donde está el relleno.

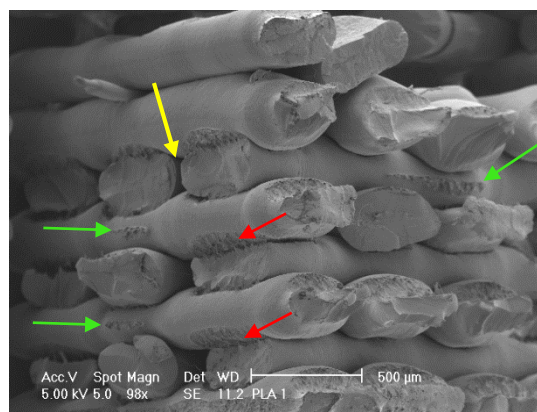
En la panorámica del Exp#2, se ve muy bien el entrecruzado de los hilos, y el pegado y la morfología de los mismos es bastante uniforme en todo el área de relleno. Si bien es cierto que la fractura no se ha producido en un solo plano, sino que se ha ido produciendo siguiendo algunos de los hilos a 45°. Si se mirase la fractura desde arriba, se vería una superficie dentada (ver en el **ANEXO VII** las capturas de planta al microscopio estereoscópico). Esto es porque, aunque el área de relleno sea bastante uniforme, se aprecian algunas zonas más compactas que otras. En la zona de la izquierda, se ven incluso algunos hilos sueltos que se han estirado antes de romper. Si ampliamos esa zona (*Ilustración 95*) vemos como hay muchos huecos de fibras que se han quedado en la otra mitad de la probeta, lo que deja una superficie mucho menos compacta y con irregularidades. Si nos fijamos ahora en la ampliación de la zona central (*Ilustración 96*), la formación es mucho más compacta y la fractura en todo el plano es mucho más regular.



Por otro lado, se aprovecha la misma *Ilustración 96* para comentar otro tipo de apreciaciones. Aunque sea una zona más compacta, se observa que los hilos de la misma capa no están completamente juntos, no se llegan a tocar (flecha amarilla) en la mayoría de sus puntos. Esto favorece que los hilos de la misma capa no se adhieran entre sí. No obstante, en algunos puntos (flechas verdes) se nota que sí que hay contacto y que se han producido reacciones entre las superficies de hilos vecinos de la misma capa. Entre los hilos de capa consecutivas se ve que siempre hay contacto, y un poquito de presión, lo que favorece que haya reacciones de adhesión entre las superficies en la mayoría de los casos (flechas rojas).

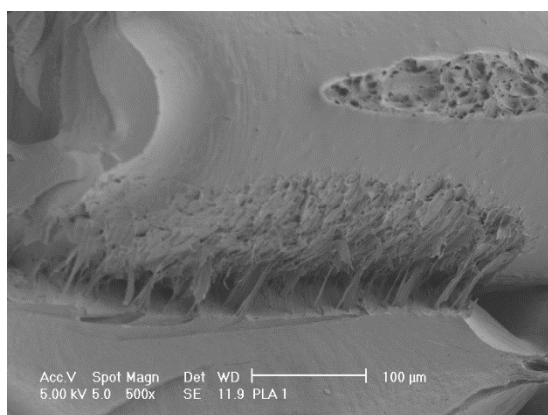


*Ilustración 95. Ampliación Exp#2. Izquierda*

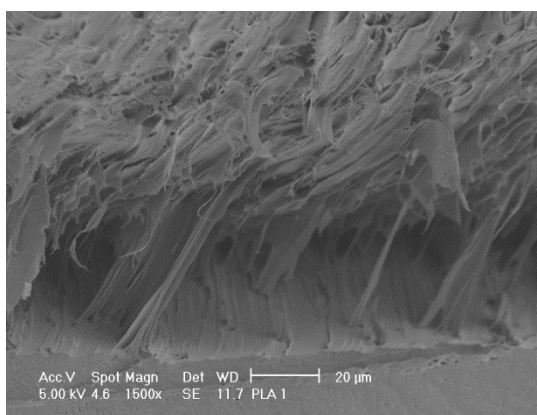


*Ilustración 96. Ampliación Exp#2. Centro*

Para visualizar mejor esta adhesión se presenta la *Ilustración 97*, donde se puede observar tanto una zona donde se han adherido dos hilos de la misma capa (aunque se hayan despegado), como otra zona donde se han adherido hilos pertenecientes a capas consecutivas y que se han despegado parcialmente pero siguen unidos. Este último fenómeno se puede observar mejor a más aumentos (*Ilustración 98*).



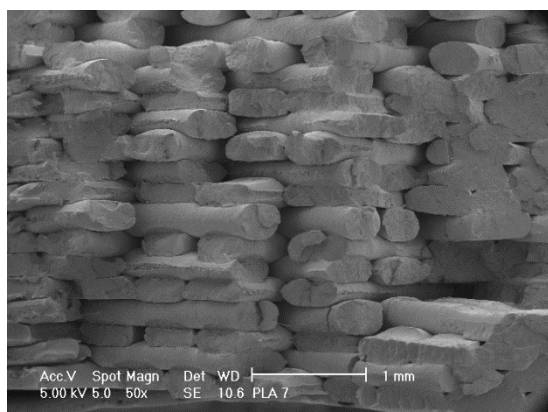
*Ilustración 97. Zonas de adhesión entre hilos*



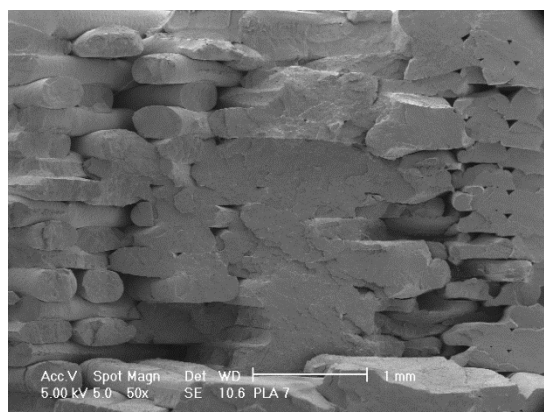
*Ilustración 98. Despegue parcial entre diferentes capas*

La panorámica del Exp#7 revela muchas más irregularidades que la del Exp#2. Si observamos la ampliación de la zona central (*Ilustración 99*), se ve que la apariencia similar a la *Ilustración 96* del Exp#2. Sin embargo en la zona de la derecha parece haber habido muy buena adhesión entre los hilos. En la *Ilustración 100* se aprecia una zona donde no se pueden distinguir los hilos, ya que se han cohesionado formando una zona sólida. Es muy probable que este sea uno de los motivos por los que las muestras del experimento número 7 dieron uno de los resultados de densidad más elevados ( $1,17 \text{ g/cm}^3$ ), así como la mayor resistencia a tracción. Con respecto a la densidad, las imágenes tanto de microscopia estereoscópica como las de SEM, muestran que las

piezas no son totalmente densas coincidiendo con los menores valores de densidad obtenidos por el método de Arquímedes en comparación con la densidad del filamento.



*Ilustración 99. Ampliación Exp#7. Centro*

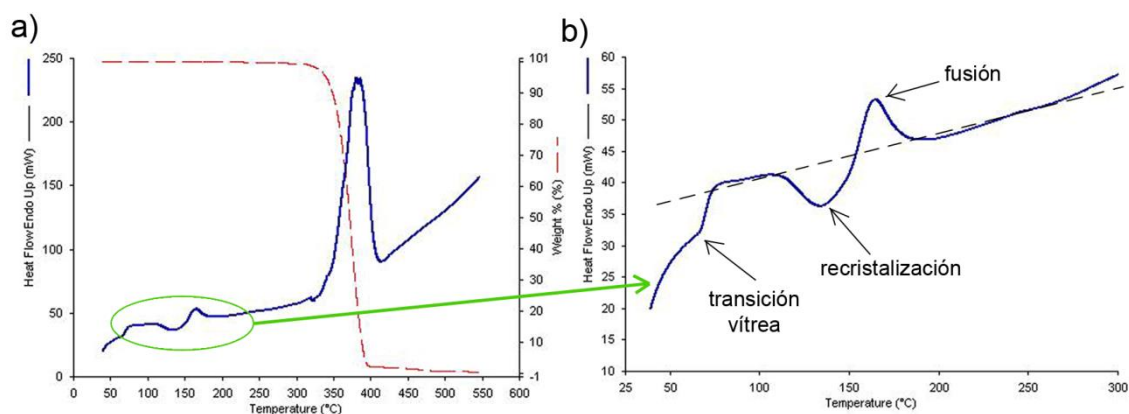


*Ilustración 100. Ampliación Exp#7. Derecha*

## 4.7 ANÁLISIS TÉRMICOS

Ya se ha estudiado en apartados anteriores el efecto que tiene un buen pegado de las fibras en las propiedades mecánicas y la densidad. Queda sin embargo estudiar el comportamiento térmico del filamento del PLA para ver cómo puede estar afectando a nuestros resultados.

Para comprender el comportamiento frente a temperatura del filamento de PLA usado en este trabajo se llevaron a cabo ensayos de calorimetría diferencial de barrido (DSC) y análisis termogravimétricos (TGA) cuyo fundamento ya se explicó en el apartado de equipos.



*Ilustración 101. Curvas de DSC y TGA y ampliación de zona*

En la *Ilustración 101.a* se muestran simultáneamente las curvas de DSC y TGA para un intervalo de temperaturas desde 30 °C hasta 550 °C. En la *Ilustración 101.b* se muestra una ampliación de la curva DSC en un rango de temperaturas en el que se pueden observar más claramente diferentes procesos que implican una absorción o cesión de calor por parte de la muestra. Este ensayo se realizó en atmósfera inerte de nitrógeno aplicando una rampa de calentamiento a la muestra de 5 °C/min.

De las curvas se puede deducir que primeramente, en el rango de temperaturas de 50 °C a 100 °C, hay un cambio endotérmico en el flujo de calor que podría atribuirse por sus características

a una transición vítrea, ya sea del PLA o de algún otro aditivo que se le haya podido añadir al filamento. Esta transición se produce a una temperatura en la que el equipo aún muestra cierta inercia térmica; es por ello que existen ciertas dudas sobre si realmente se produce una transición vítrea o el flujo de calor está asociado a otro proceso. Por debajo de la  $T_g$ , las cadenas poliméricas interaccionan entre sí formando enlaces débiles tipo Van der Waals, puentes de hidrógeno, fuerzas de London... Una vez sobrepasado esta  $T_g$  los enlaces débiles empiezan a romperse y las cadenas adquieren mayor movilidad, por lo que el material se reblandece y pasa de un estado sólido rígido a un estado visco elástico. La  $T_g$  está asociada a polímeros amorfos.

Según aumenta la temperatura, se puede apreciar más claramente una línea base (marcada con una línea negra discontinua). A partir de esta línea base, entre 120 °C y 160 °C se aprecia un pico exotérmico que podría estar atribuido a un proceso de recristalización de las cadenas poliméricas de PLA. Los polímeros, pese a que en su mayor parte presentan una estructura desordenada de sus cadenas (estructura amorfa), pueden presentar ciertas regiones en las que las cadenas se apilan de una manera más ordenada y compacta (estructura "cristalina"). Una vez sobrepasada la  $T_g$ , las cadenas han adquirido mayor libertad de movimiento y pueden redistribuirse en estructuras ordenadas formando lamelas; el polímero se dice que recristaliza. Este proceso es exotérmico ya que una estructura ordenada minimiza la energía del sistema y por tanto se produce una cesión de calor por parte de la muestra. La capacidad de un polímero para cristalizar depende de muchos factores entre los que destacan: no presentar monómeros muy voluminosos que permitan una buena rotación de la cadena, que las cadenas sean lineales y no haya ramificaciones y que se puedan formar interacciones entre distintos puntos de la cadena o entre distintas cadenas. Estas interacciones se dan mediante enlaces débiles.

Tras el pico de recristalización, y considerando siempre la línea base, se observa un pico endotérmico que muy probablemente esté asociado a la fusión tanto de la parte que anteriormente ha cristalizado como de posibles regiones cristalinas que hubiera formadas previamente en el material antes del ensayo. Durante la fusión, los enlaces débiles entre las cadenas poliméricas de regiones cristalinas se rompen y el sistema vuelve a adquirir más libertad de movimiento por lo que pasa a estar en un estado similar al de un líquido viscoso.

Este comportamiento es similar al descrito por Miyazaki [48], en los que una muestra de PLA de la que se desconoce el proveedor presentaba: una transición vítrea en torno a los 60 °C, un proceso de recristalización en torno a los 100°C y una fusión en torno a los 175 °C. También se encontraron similitudes en el trabajo de Dong [49] del que se obtiene la Ilustración 102, en la que la curva (a) corresponde a una muestra de PLA y el resto a mezclas PLA/PBAT/HDE en diferentes porcentajes.

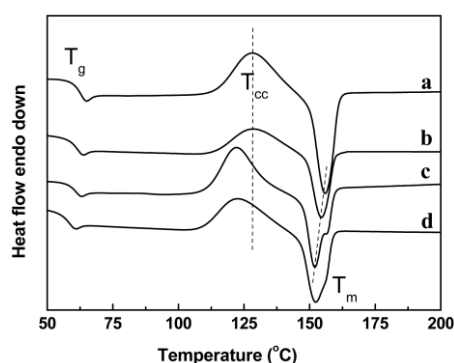


Ilustración 102. Curvas obtenidas por Dong. La curva (a) corresponde al PLA

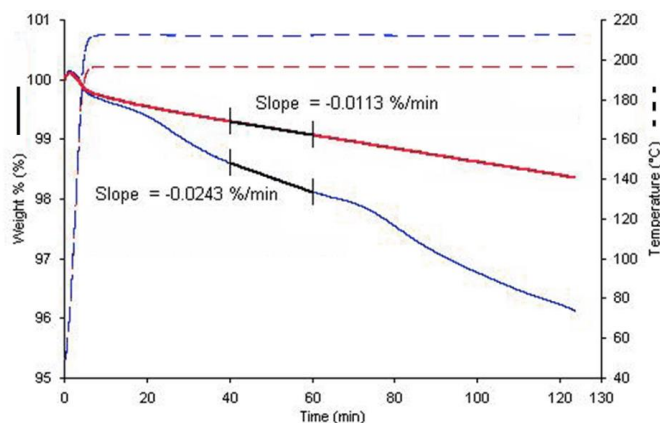


Cabe destacar que a las temperaturas elegidas para fabricar las piezas, según nos muestran las curvas DSC, el polímero estará completamente en un estado fundido. Esto es muy importante para asegurar una buena fluidez del material y una buena deposición del mismo sobre las diferentes capas. Una vez fundido, el efecto de un aumento de temperatura sobre el PLA (a temperaturas por debajo de la degradación) es permitir un mejor movimiento de las cadenas poliméricas con lo que la viscosidad disminuye y aumenta la fluidez. Previamente a la elección de las temperaturas de impresión utilizadas en este trabajo, se llevaron intentos de impresión a temperaturas menores de 195 °C y debido a que el material aún no estaba completamente fundido no se pudo llevar a cabo una impresión correcta, produciéndose atascos en el extrusor.

Centrándonos ahora en la curva de pérdida de peso frente a temperatura de Ilustración 101.a, parece que no existe una pérdida significativa de peso de la muestra de PLA hasta los 300 °C. Sin embargo, para verificar el efecto de someter una muestra de filamento a las temperaturas elegidas para la fabricación de piezas en este trabajo, se llevaron a cabo ensayos isotérmicos en los que la temperatura se mantuvo a 195 °C o 215 °C durante dos horas, esta vez en atmósfera de aire para reproducir mejor las condiciones de ensayo. Los resultados de estos ensayos se muestran en la *Ilustración 103*, en los que se puede observar la pérdida en peso frente al tiempo para las dos temperaturas mencionadas.

El proceso de degradación de un polímero consiste en que a ciertas temperaturas, ciertas reacciones entre puntos de la cadena polimérica o entre cadenas pueden ocurrir, provocando una escisión de la cadena que se fragmenta en pesos moleculares menores o la formación de nuevos compuestos. Si el tamaño de los fragmentos de cadena o de los compuestos formados es suficientemente pequeño, estos pueden volatilizarse por lo que la muestra empezará a experimentar una pérdida de peso que registrará el TGA. Cabe destacar que mediante TGA sólo se empiezan a registrar pérdidas en peso cuando los fragmentos de cadena son lo suficientemente pequeños. Esto no quiere decir que el material se empiece a degradar a temperaturas o tiempos menores produciendo fragmentos aún no volátiles.

Como se aprecia en la *Ilustración 103*, durante los primeros minutos de ensayo tanto a 195 °C como a 215 °C se aprecia una pérdida en masa de en torno al 0,2-0,4 % a un ritmo que coincide en ambas muestras, suavizándose posteriormente la pendiente de la pérdida en masa. Esta primera pérdida en masa está asociada a la eliminación de agua que pueda haber sido absorbida por la muestra o a la de algún aditivo que se le haya podido echar al filamento para mejorar sus condiciones de procesado. Posteriormente las curvas empiezan a mostrar comportamientos diferentes.



*Ilustración 103. Curvas obtenidas con los ensayos isotérmicos*

En el caso del ensayo a 195 °C la pérdida en masa se produce a un ritmo constante de 0,0113 %/min. Tras dos horas de ensayo y sin considerar la pérdida inicial en masa debido muy probablemente a la evaporación de agua, la muestra ha perdido un 1,5 % en peso. En el caso del ensayo a 215 °C el comportamiento es muy distinto ya que la pérdida en peso no se produce a un ritmo constante durante todo el ensayo y además la velocidad de pérdida en peso es mayor que en el caso de 195 °C. Durante los primeros 20 minutos pese a que la pendiente es más pronunciada que en 195 °C, el comportamiento a 215 °C es bastante similar. A partir de los 20 minutos se produce una disminución más brusca de peso a un ritmo aproximadamente el doble que a 195 °C. A los 70 minutos la pendiente vuelve a aumentar llegándose a una pérdida de en torno al 4 % en peso a las 2 horas de ensayo.

El proceso de degradación del PLA está activado por la temperatura y muy probablemente por la formación de compuestos secundarios que den lugar a su vez a reacciones secundarias. En el caso del ensayo a 195 °C, parece que sólo se presenta un mecanismo de degradación ya que la pérdida en peso se mantiene constante. En el ensayo a 215 °C, los cambios de pendiente sugieren la activación de nuevos tipos de reacciones entre puntos de la cadena y formación de nuevos compuestos que puedan estar catalizando el proceso de degradación del PLA.

Durante el proceso de impresión y aunque el tiempo que el filamento permanece en el *hot-end* hasta ser fundido y depositado es pequeño, debido a las temperaturas de impresión utilizadas y aunque la pérdida en peso se considere despreciable, puede que se produzca cierta degradación del polímero. Esta degradación, como ha quedado demostrado con los ensayos térmicos, está más activada a 215 °C por lo que puede que el aspecto final de las piezas presente un tono más amarillento que en el caso de 195 °C. Habría también que discutir si la diferencia de la degradación producida a diferentes temperaturas puede llegar a afectar también a las propiedades mecánicas de manera significativa o de forma despreciable.

Como se desprende del análisis factorial, la temperatura del *nozzle* no afecta en gran medida a la resistencia de las piezas. Además se prefería un nivel (-), esto es, la temperatura de 195 °C. Puede ser que una diferencia de 20 °C no esté influenciando mucho el pegado entre las muestras ya que la viscosidad del filamento a esa temperatura puede ser similar y lo que más esté influenciando sea que la capa sobre la que se deposite el filamento esté a una temperatura elevada. Sin embargo, el que se prefiera un factor negativo puede ser debido a que el efecto de la degradación sí que esté influenciando en la resistencia aunque de forma débil.

Hay que tener en cuenta que el filamento pasa muy rápidamente por el *nozzle* hasta que es depositado por lo que atendiendo a las gráficas del TGA la diferencia entre las temperaturas de 195 °C y 215 °C es muy baja, lo que explicaría, junto con los otros motivos anteriormente expuestos, la baja influencia de este factor en los resultados.

## 5 CONCLUSIONES

Este trabajo pretendía realizar un estudio de cómo afectan ciertos parámetros de procesado en las propiedades de piezas del PLA impresas por deposición fundida: velocidad de impresión, temperatura de la cama, temperatura del extrusor y ventilador. Para ello se planteó un diseño factorial de experimentos 2<sup>4</sup>. Tras los resultados obtenidos se puede concluir que:

- Se consiguió montar y calibrar un impresora de deposición fundida capaz de imprimir con un filamento de PLA de diámetro 3.00 mm, permitiendo una tolerancia dimensional media en las muestras de 0,94 mm en los ejes X e Y y 0,46 mm en el eje Z.
- Los parámetros más influyentes a la hora de optimizar la resistencia a tracción son la velocidad de impresión y la temperatura de la cama.
- La interacción, de acuerdo a los resultados de tensión, entre los factores de temperatura de la cama y extrusor, es fuerte. Esto quiere decir que el resultado que tiene variar uno de esos factores depende del nivel al que se encuentre el otro.
- Por sí solos, la temperatura del *nozzle* influye en muy baja medida a la resistencia a tracción y el uso o no de ventilador se puede considerar despreciable.
- De acuerdo con nuestro dominio experimental, los parámetros seleccionados para optimizar la resistencia a tracción de las piezas son:

Velocidad de impresión	60 mm/s
Temperatura de la cama	70 °C
Temperatura del extrusor	195 °C
Ventilador	100%

Tabla 26. Parámetros resultantes para optimizar la resistencia a tracción

Con esta combinación de parámetros se obtiene un valor máximo para la resistencia a tracción de 34,4 MPa. El valor medio de todos los resultados para las 16 combinaciones de factores estudiadas es 29,5 MPa y el valor mínimo de 26,2 MPa.

- No se han podido sacar resultados concluyentes de la influencia de los diferentes factores en la elongación final de las piezas debido a la enorme variabilidad en los resultados obtenida.
- La distancia inicial del *nozzle* respecto de la cama de impresión es un factor importante a tener en cuenta. Esta distancia determinará la compresión entre capas (principalmente las primeras) y tendrá efectos en las dimensiones, densidad y apariencia de la pieza como se demostró mediante observaciones con el microscopio estereoscópico.
- Mediante observaciones con el SEM se puede relacionar los mejores resultados en cuanto a resistencia a tracción con un mejor pegado entre las capas.
- En este sentido es muy importante que la capa sobre la que se deposita filamento fresco esté a cierta temperatura, quedando esto demostrado ya que los factores más influyentes fueron

una velocidad rápida de impresión y mantener la temperatura de la cama a 70 °C (por encima o muy próxima a la  $T_g$  del PLA)

- El estudio de degradación mediante TGA demostró que a mayor temperatura se producía una degradación más rápida, pero dado que no se tarda mucho tiempo desde que el filamento es calentado por el *nozzle* hasta que se deposita y dado que no debe haber mucha variación de la viscosidad del PLA fundido con una diferencia de 20 °C, la temperatura del *nozzle* tiene un efecto muy bajo sobre la resistencia a tracción.

## 6 LÍNEAS FUTURAS

Tras el trabajo realizado, se plantean cuestiones sobre las que se podría profundizar en trabajos futuros.

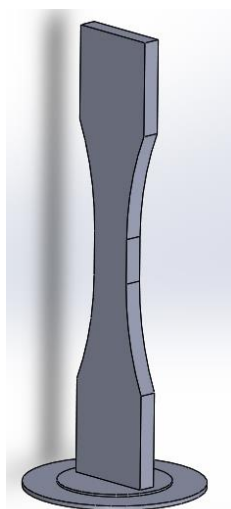
- *Incrementar el número de pizas ensayadas*

Debido a limitaciones de tiempo y sobre todo de material, sólo se pudieron imprimir tandas de 3 probetas por combinación de factores. Se pensó en un principio que sería suficiente para tener un estadístico. Especialmente en los valores de la deformación final, se observó que para muchas combinaciones de factores había una gran variabilidad de resultados. Para mejorar este estudio se propone repetir los ensayos hasta que se observe una tendencia clara, eliminando resultados atípicos.

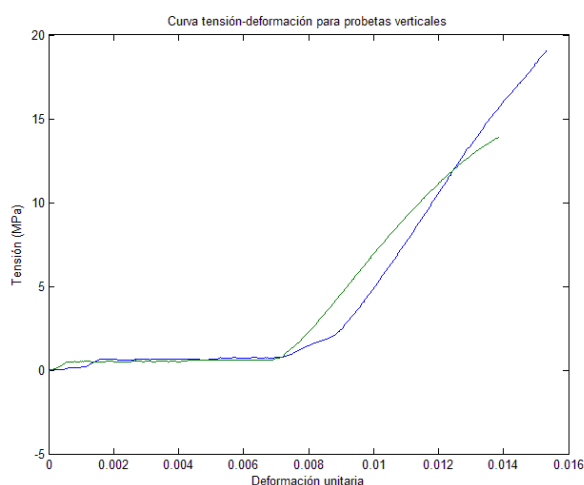
- *Estudio de la anisotropía de las piezas*

Como se ha demostrado en este estudio, el pegado de las capas es determinante en las propiedades mecánicas que tendrá la pieza final. Es por esto que los esfuerzos que aguante la pieza están estrechamente relacionados con su orientación de impresión.

Se propone realizar un estudio similar a este imprimiendo las probetas en diferentes orientaciones, para comparar y evaluar los resultados. Como tanteo de este aspecto, se dispuso de material para imprimir un par de probetas en vertical, ayudándose de una base circular diseñada para adherir la pieza a la cama durante su impresión (*Ilustración 104*). También se acortó 50 mm la longitud de la probeta para mejorar su estabilidad y que cupiese en el volumen de impresión.



*Ilustración 104. Probeta reducida en vertical*



*Ilustración 105. Curva  $\sigma$ - $\epsilon$  para dos probetas impresas en vertical*

En este tanteo se observó que las tensiones máximas que soportaban estas probetas fueron 19,1 y 13,9 MPa, y que la curva tensión-deformación (*Ilustración 105*) varía respecto a las obtenidas anteriormente, siendo aquí mayor la *zona de establecimiento* (se empleó una célula de 1kN y mordazas diferentes a los otros ensayos), y existiendo sólo una zona lineal hasta el punto de rotura. Aunque este estudio requiera de una mayor profundidad, se confirma que las propiedades mecánicas de las piezas impresas dependen de la orientación de impresión y las direcciones de las cargas a las que estén sometidas.

- *Estudio con una atmósfera mejor controlada*

En la *Ilustración 46* se puede observar como la máquina empleada tiene su espacio de impresión “al aire”. Para comprobar de una forma más precisa el efecto que tiene cada parámetro de impresión, sería conveniente cerrar este espacio, idealmente imprimir en el vacío, y poder controlar con precisión cada parámetro para tener unos resultados más precisos y fiables.

- *Estudio de más parámetros*

Como se ha visto en el trabajo debido al problema de la distancia inicial del *nozzle*, la altura de capa juega un papel importante en la compactación de la pieza. Este es un parámetro interesante que se podría evaluar. Sería interesante a su vez realizar este estudio en una impresora que pudiera controlar mejor esta variable.

Así mismo, el PLA es un polímero semicristalino (como se demostró mediante DSC). La cristalinidad de un polímero afecta a sus propiedades mecánicas. El grado de cristalinidad conseguido tras la impresión dependerá de muchos factores como la velocidad de enfriamiento, la temperatura del fundido,...Estos parámetros se pueden ver afectados por la variación en los factores llevados a cabo en este estudio, por lo que habría que realizar un estudio sobre cómo afectan a la cristalinidad.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] D. L. Bourell, J. J. Beaman, J. C. Ming y L. a. D. W. Rosen, «A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead,» Istanbul, Turkey, 2009.
- [2] O. J. Munz, "Photo-Glyph Recording". United States Patent 2775758, 25 May 1956.
- [3] D. T. Pham y S. G. R., «A comparison of rapid prototyping technologies,» *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 38, pp. 1257-1287, 1998.
- [4] D. G. Reyes Pozo, «Enginyers Industrials de Catalunya,» [En línea]. Available: <http://www.eic.cat/gfe/docs/10585.pdf>. [Último acceso: 25 06 2014].
- [5] R. Noorani, Rapid Prototyping. Principles and Applications, John Wiley & Sons, 2006.
- [6] A. Borille, J. Gomes, R. Meyer y K. Grote, «Applying decision methods to select rapid prototyping technologies,» *Rapid Prototyping Journal*, vol. 16, nº 1, pp. 50 - 62, 2010.
- [7] M. Zahera, «La fabricación aditiva, tecnología avanzada para el diseño y desarrollo de productos,» de *XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, Valencia, 2012.
- [8] Massachusetts Institute of Technology, «What is the 3DP Process?,» 28 06 2000. [En línea]. Available: <http://web.mit.edu/tdp/www/whatis3dp.html>. [Último acceso: 25 06 2014].
- [9] Stratasys, «Corporate,» [En línea]. Available: <http://www.stratasys.com/corporate/about-us>. [Último acceso: 21 06 2014].
- [10] S. Crump, "Apparatus and method for creating three-dimensional objects". United States Patent 5121329, 09 06 1992.
- [11] A. C. Brown y D. de Beer, «Development of a stereolithography (STL) slicing and G-Code generation algorithm for an entry level 3-D printer,» de *Africon*, Mauritius, 2013.
- [12] M. L. Swank, B. E. Stucker, F. R. Medina and R. B. Wicker, *Integrating UC and FDM to Create a Support Materials Deposition System*, Utah State University, 2010.
- [13] Joe Hiemenez, Stratasys Inc., «3D Printing With FDM white paper.,» [En línea]. Available: [http://www.stratasys.com/~media/Main/Secure/White%20Papers/Rebranded/SSYS\\_WP\\_3d\\_printing\\_with\\_fdm.pdf](http://www.stratasys.com/~media/Main/Secure/White%20Papers/Rebranded/SSYS_WP_3d_printing_with_fdm.pdf). [Último acceso: 27 06 2014].
- [14] J. Kentzer, B. Koch, M. Thiim, R. W. Jones y E. Villumsen, «An Open Source Hardware-based Mechatronics Project: The Replicating Rapid 3-D Printer,» de *4th International Conference on Mechatronics*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2011.

- [15] Stratasys, «Mojo - Give your big idea a little Mojo,» [En línea]. Available: <http://www.stratasys.com/3d-printers/idea-series/mojo>. [Último acceso: 01 07 2014].
- [16] L. L. «Engineering Exchange,» 08 05 2012. [En línea]. Available: <http://www.engineeringexchange.com/forum/topics/new-desktop-professional-fdm-3d-printer-for-less-than-10k-from>. [Último acceso: 01 07 2014].
- [17] «RepRap Project,» Wikipedia, [En línea]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/RepRap\\_Project](http://en.wikipedia.org/wiki/RepRap_Project). [Último acceso: 18 07 2014].
- [18] «Imagen. RepRap. Prusa iteración 2,» [En línea]. Available: [http://reprap.org/mediawiki/images/thumb/6/64/Assembled\\_JLK.png/400px-Assembled\\_JLK.png](http://reprap.org/mediawiki/images/thumb/6/64/Assembled_JLK.png/400px-Assembled_JLK.png). [Último acceso: 18 07 2014].
- [19] A. Barrientos, L. F. Peñín, C. Balaguer y R. Aracil, Fundamentos de Robótica, Madrid: McGraw-Hill, 2007.
- [20] K. Farkas, «R-360. RepRap Wiki.,» 20 03 2014. [En línea]. Available: [http://reprap.org/wiki/R\\_360](http://reprap.org/wiki/R_360). [Último acceso: 01 07 2014].
- [21] qharley, «Morgan. RepRap Wiki.,» 28 10 2013. [En línea]. Available: [http://reprap.org/wiki/RepRap\\_Morgan](http://reprap.org/wiki/RepRap_Morgan). [Último acceso: 01 07 2014].
- [22] A. Montiveo, «Blog. Beginner's Guide to 3D Printing,» 30 09 2014. [En línea]. Available: <http://www.supermediastore.com/blog/article/nitty-gritty-3d-printing>. [Último acceso: 20 06 2014].
- [23] «Fablab. Chile,» [En línea]. Available: <http://fablab.cl/wp-content/uploads/2013/04/ModeloDeExtrusor.jpg>. [Último acceso: 12 06 2014].
- [24] SIIM, «Propiedades físico-mecánicas del ABS,» [En línea]. Available: <http://www.siim.com/docs/RAE-1018.pdf>. [Último acceso: 06 08 2014].
- [25] L. Tin Sin, A. R. Rahmat y W. A. W. A. Rahman, Polylactic acid. PLA Biopolymer Technology and Applications, 2012.
- [26] A. A. Relaño Pastor y J. Hidalgo García, *Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida*, Leganés: UC3M, Octubre 2013.
- [27] NatureWorks, «Ingeo™ Biopolymer 4032D Technical Data Sheet Biaxially Oriented Films – High Heat,» [En línea]. Available: [http://www.natureworkslc.com/~media/Technical\\_Resources/Technical\\_Data\\_Sheets/TechnicalDataSheet\\_4032D\\_films\\_pdf.pdf](http://www.natureworkslc.com/~media/Technical_Resources/Technical_Data_Sheets/TechnicalDataSheet_4032D_films_pdf.pdf). [Último acceso: 07 08 2014].
- [28] B. Stephens, P. Azimi, Z. El Orch y T. Ramos, «Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers,» *Atmospheric Environment*, nº 79, pp. 334 - 339, 2013.
- [29] M. Balkcom, B. Welt y K. Berger, *Notes from the Packaging Laboratory: Polylactic Acid -- An Exciting New Packaging Material*.

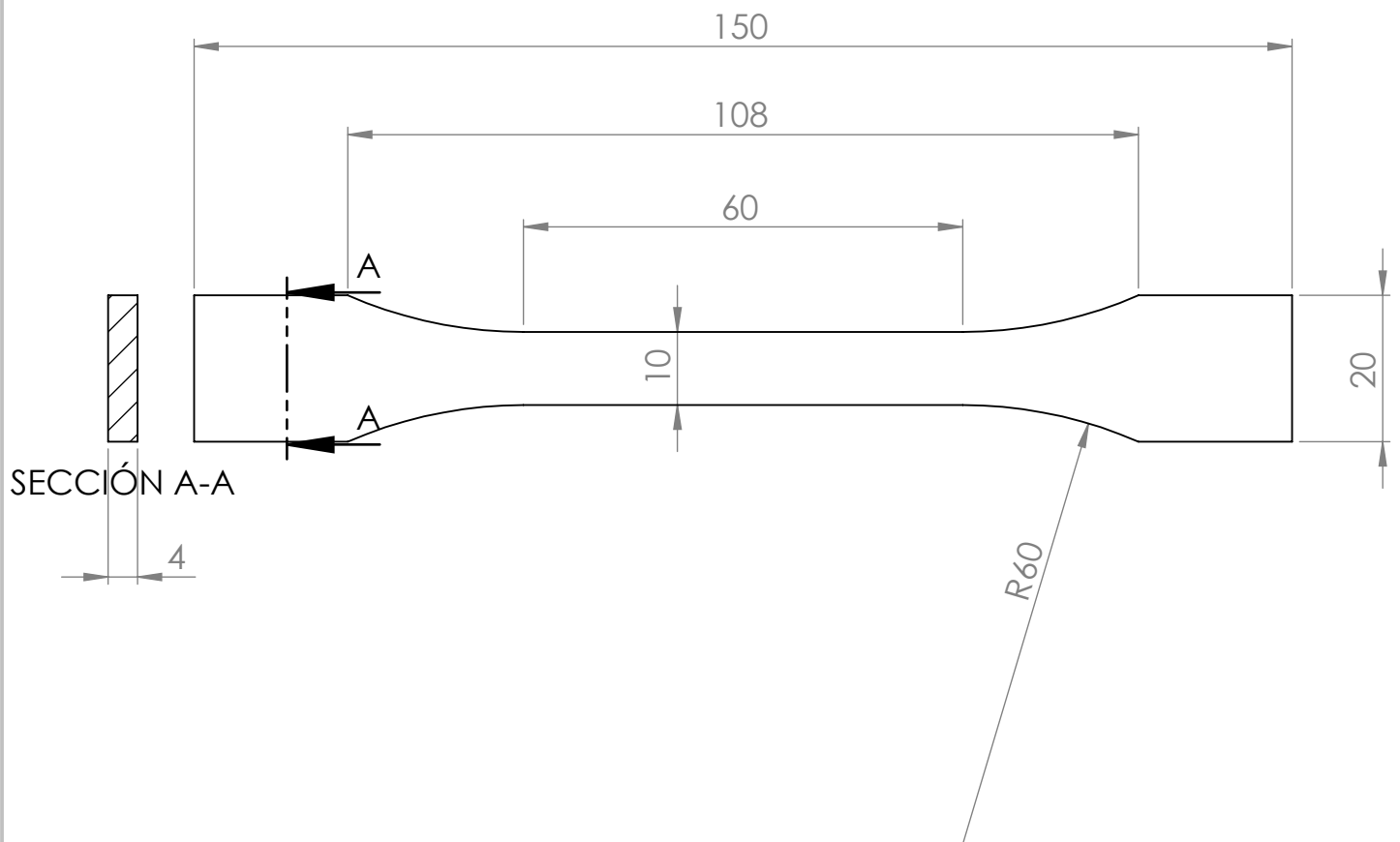


- [30] Makerbot, "E3D Fan Dual Assembly for Makergear M2," 20 Febrero 2014. [Online]. Available: <http://www.thingiverse.com/thing:254004>. [Accessed 28 Febrero 2014].
- [31] W. Castro Smith y R. W. Dean, «Structural characteristics of fused deposition modeling polycarbonate material,» *Polymer Testing*, vol. 32, pp. 1306 - 1312, 2013.
- [32] D. Drummer, S. Cifuentes-Cuéllar y D. Rietzel, «Suitability of PLA/TCP for fused deposition modeling,» *Rapid Prototyping Journal*, vol. 18, nº 6, pp. 500 - 507, 2012.
- [33] J. de Ciurana, L. Serenó y È. Vallés, «Selecting process parameters in RepRap additive manufacturing system for PLA scaffolds manufacture,» de *The First CIRP Conference on Biomanufacturing*, 2013.
- [34] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 5th ed., John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [35] J. Ferré, *El diseño factorial completo 2<sup>k</sup>*, Tarragona: Universidad Rovira i Virgili.
- [36] Asociación Española de Normalización y Certificación, *UNE-EN ISO 527-2:2012. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión.*, Madrid: AENOR, Noviembre 2012.
- [37] Asociación Española de Normalización y Certificación, *UNE-EN ISO 527-1:2012. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales*, Madrid: AENOR, Noviembre 2012.
- [38] R. García Das Neves, *Procesamiento de polvos de Ti mediante asociación de técnicas coloidales y pulvimetalúrgicas. Tesis doctoral*, Leganés: Universidad Carlos III de Madrid, 2014.
- [39] M. Vera Coello, I. Iglesias Estradé, A. L. Sánchez Pérez y C. Martínez Bazán, *Ingeniería Fluidomecánica*, Dpto. de Ingeniería Térmica y Fluidos. Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- [40] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera y D. P. Dewitt, *Introduction to Heat Transfer*, John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [41] Centro Óptico Electrónico (Costa Rica), «Tipos de microscopios,» [En línea]. Available: [http://www.coecr.com/files/konus\\_microscopios.pdf](http://www.coecr.com/files/konus_microscopios.pdf). [Último acceso: 09 09 2014].
- [42] Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid., «Principios generales de la Microscopía Electrónica de Barrido,» [En línea]. Available: <http://www.icmm.csic.es/divulgacion/posters/TEC-Microscopia%20Electronica%20de%20Barrido.pdf>. [Último acceso: 09 09 2014].
- [43] J. Hidalgo García, *Development of binder systems based on CAB for powder injection moulding (PIM) and micro powder injection moulding ( $\mu$ -PIM) of Zircon and Invar powders. PhD Thesis*, Leganés: Universidad Carlos III de Madrid, January 2012.

- [44] F. J. González Benito, «OpenCourseWare UC3M. Caracterización de Materiales. Apuntes Métodos de Análisis Térmico,» 07 2008. [En línea]. Available: [http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/caracterizacion-de-materiales/material-de-clase-1/Apuntes\\_MeTODOS\\_DE\\_ANALISIS\\_TERMICO.pdf/view](http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/caracterizacion-de-materiales/material-de-clase-1/Apuntes_MeTODOS_DE_ANALISIS_TERMICO.pdf/view). [Último acceso: 04 09 2014].
- [45] J. M. Contreras Andújar, *Estudio de la influencia de la morfología y de la distribución de tamaños de partícula del polvo en la obtención de aleaciones base Cu y base Ni mediante la tecnología MIM. Tesis Doctoral*, Leganés: Universidad Carlos III de Madrid, 2008.
- [46] Universidad de Oviedo, «Materiales no metálicos. Resistencia de polímeros,» [En línea]. Available: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion14.ResistenciaPolimeros.pdf>. [Último acceso: 20 09 2014].
- [47] B. M. Tymrak, M. Kreiger y J. M. Pearce, *Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions*, Houghton: Elsevier, 2014.
- [48] Y. Miyazaki, «Heat Capacities and Glass Transitions of the Biodegradable Synthetic Polymer Poly(Lactic Acid),» [En línea]. Available: <http://www.chem.sci.osaka-u.ac.jp/>. [Último acceso: 28 08 2014].
- [49] W. Dong, B. Zou, Y. Yan, P. Ma y M. Chen, «Effect of Chain-Extenders on the Properties and Hydrolytic Degradation Behavior of the Poly(lactide)/Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Blends,» *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 14, nº 10, pp. 20189-20203, 2013.
- [50] Johan, «Rostock. RepRap Wiki.,» 24 06 2014. [En línea]. Available: <http://reprap.org/wiki/Rostock>. [Último acceso: 01 07 2014].
- [51] «The Smartrap 3D Printer,» [En línea]. Available: <http://smartfriendz.com/3d-printer/>. [Último acceso: 01 07 2014].
- [52] «First Replication,» Wikimedia Commons, [En línea]. Available: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:First\\_replication.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:First_replication.jpg). [Último acceso: 18 07 2014].
- [53] «Imagen. RepRap modelo Darwin,» [En línea]. Available: [http://reprap.org/mediawiki/images/thumb/d/d8/All\\_3\\_axes\\_fdmd\\_sml.jpg/527px-All\\_3\\_axes\\_fdmd\\_sml.jpg](http://reprap.org/mediawiki/images/thumb/d/d8/All_3_axes_fdmd_sml.jpg/527px-All_3_axes_fdmd_sml.jpg). [Último acceso: 18 07 2014].
- [54] «Imagen. RepRap modelo Mendel,» [En línea]. Available: <http://reprap.org/mediawiki/images/thumb/1/1f/Mendel.jpg/520px-Mendel.jpg>. [Último acceso: 18 07 2014].
- [55] «Imagen. RepRap. Prusa Mendel,» [En línea]. Available: <http://www.reprap.org/mediawiki/images/thumb/8/8c/PrusaMendel.png/200px-PrusaMendel.png>. [Último acceso: 18 07 2014].

- [56] «Imagen. Prusa iteración 3,» [En línea]. Available:  
<http://www.reprap.org/mediawiki/images/4/43/Prusa3front.png>. [Último acceso: 18 07 2014].
- [57] Mecano, «Modelo Air 2. RepRap wiki,» [En línea]. Available:  
[http://reprap.org/wiki/Air\\_2](http://reprap.org/wiki/Air_2). [Último acceso: 19 07 2014].
- [58] Bq, «Imagen. Prusa i3 Hephestos,» [En línea]. Available:  
<http://www.bqreaders.com/productos/prusa-hephestos.html>. [Último acceso: 19 07 2014].
- [59] LeapTo3D, «Imagen. Prusa i3 Black Edition,» [En línea]. Available:  
[http://www.leapto3d.com/assets/products/348/product/i3\\_1.jpg?1376311033](http://www.leapto3d.com/assets/products/348/product/i3_1.jpg?1376311033).  
[Último acceso: 19 07 2014].
- [60] Mecano, «Imagen. PowerCode,» [En línea]. Available:  
<http://reprap.org/mediawiki/images/b/b6/PowerCode.jpg>. [Último acceso: 19 07 2014].





SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DIBUJ.						Anexo I. Plano de la probeta			
VERIF.									
APROB.									
FABR.									
CAUD.				MATERIAL:		N.º DE DIBUJO			
						Probeta ISO 527-21B <sup>A4</sup>			
				PESO:		ESCALA:1:1		HOJA 1 DE 1	



## ANEXO II

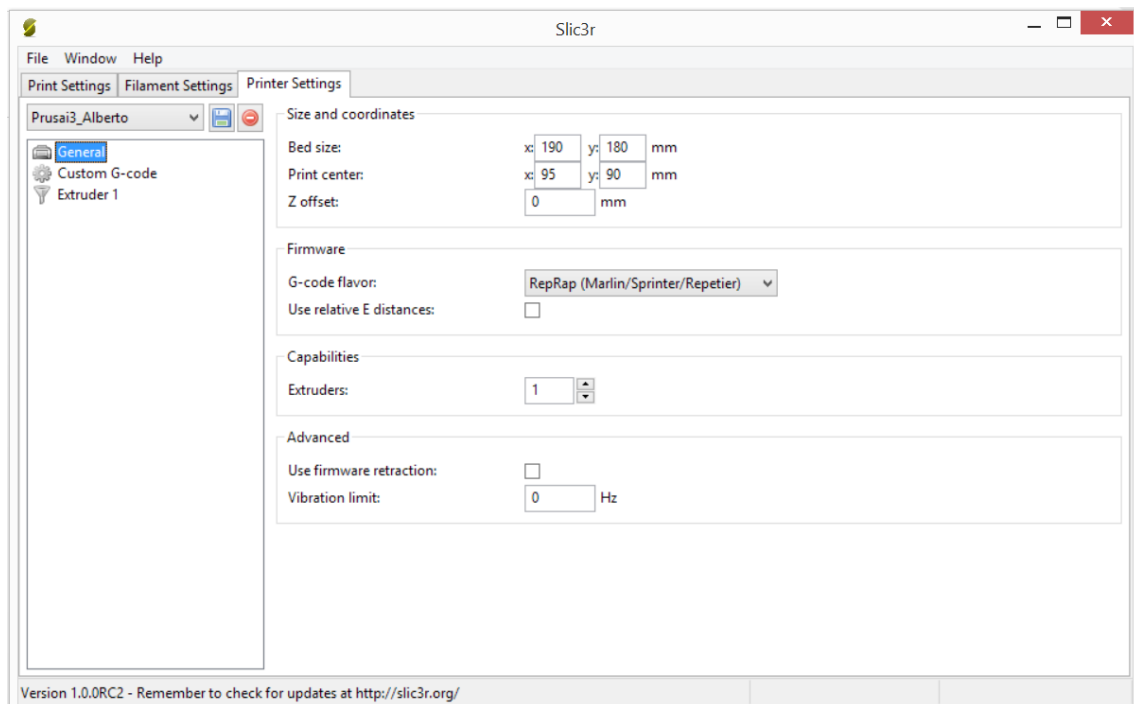
### Configuraciones de Slic3r empleadas

Para generar el *GCODE* correspondiente a todas las combinaciones planteadas en el diseño factorial, se tuvo que configurar cada aspecto de la impresión en los diferentes bloques de configuración de Slic3r y combinarlos adecuadamente.

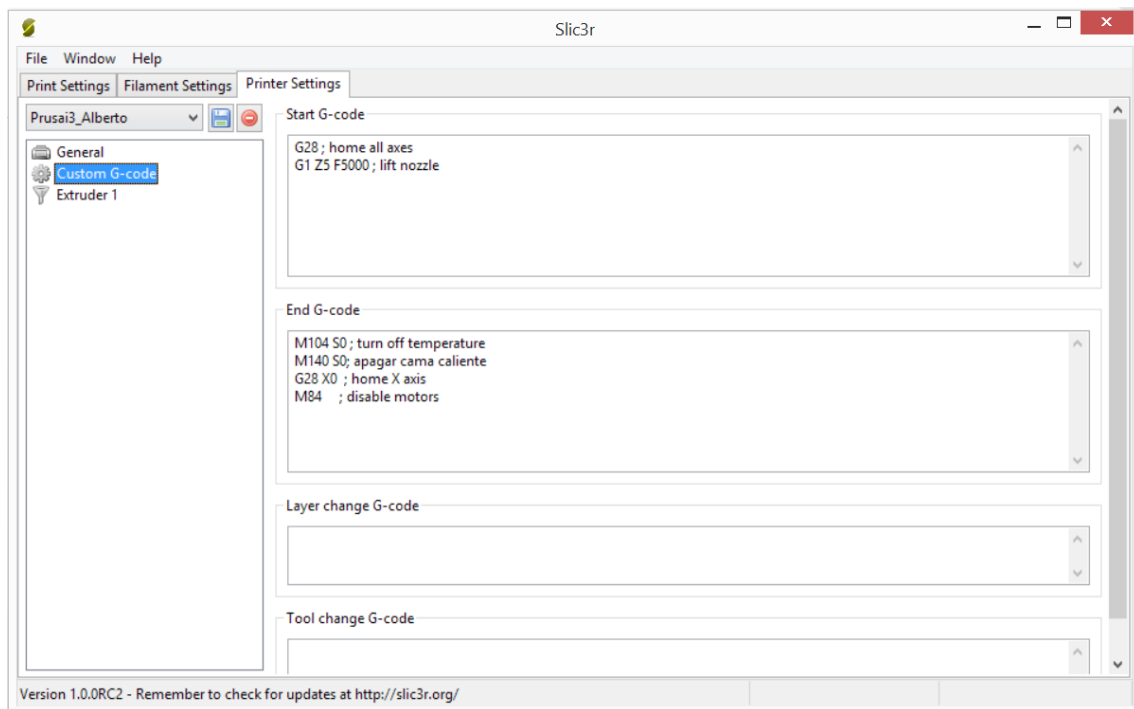
A continuación se presenta una muestra de cada una de estas configuraciones.

### Configuraciones de impresora

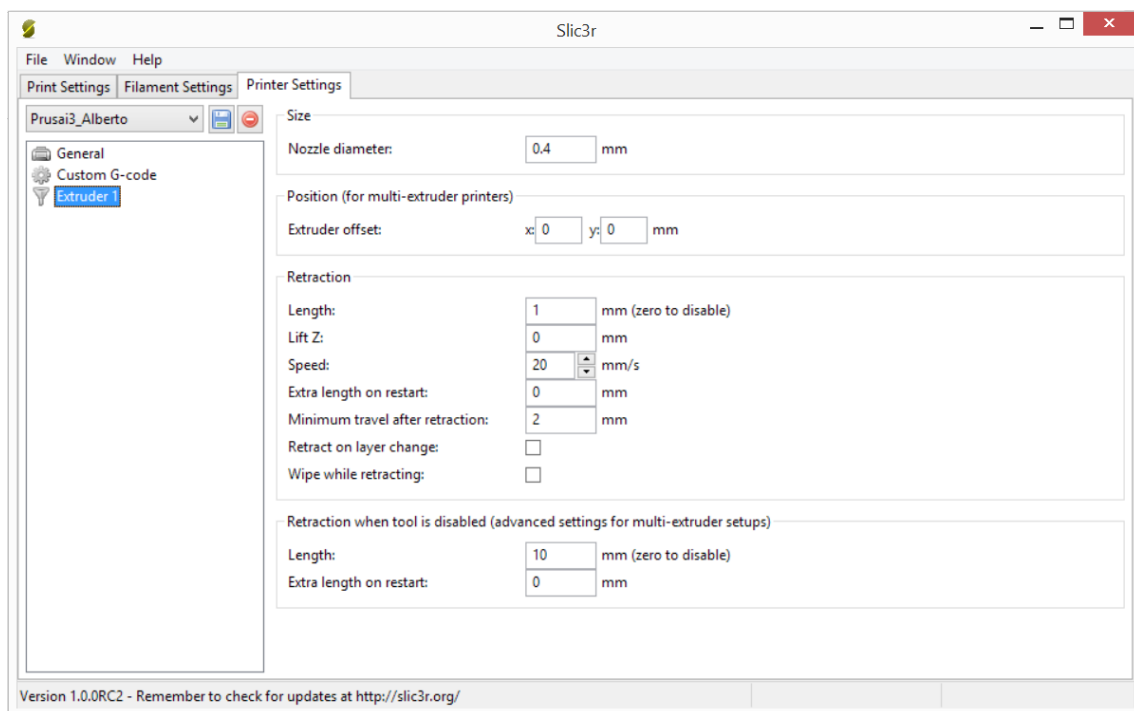
Las configuraciones de la impresora fueron iguales para todas las muestras (*Ilustración 1*, *Ilustración 2* e *Ilustración 3*).



*Ilustración 1. Configuraciones de impresora – General*



*Ilustración 2. Configuraciones de impresora - C-Code personalizado*

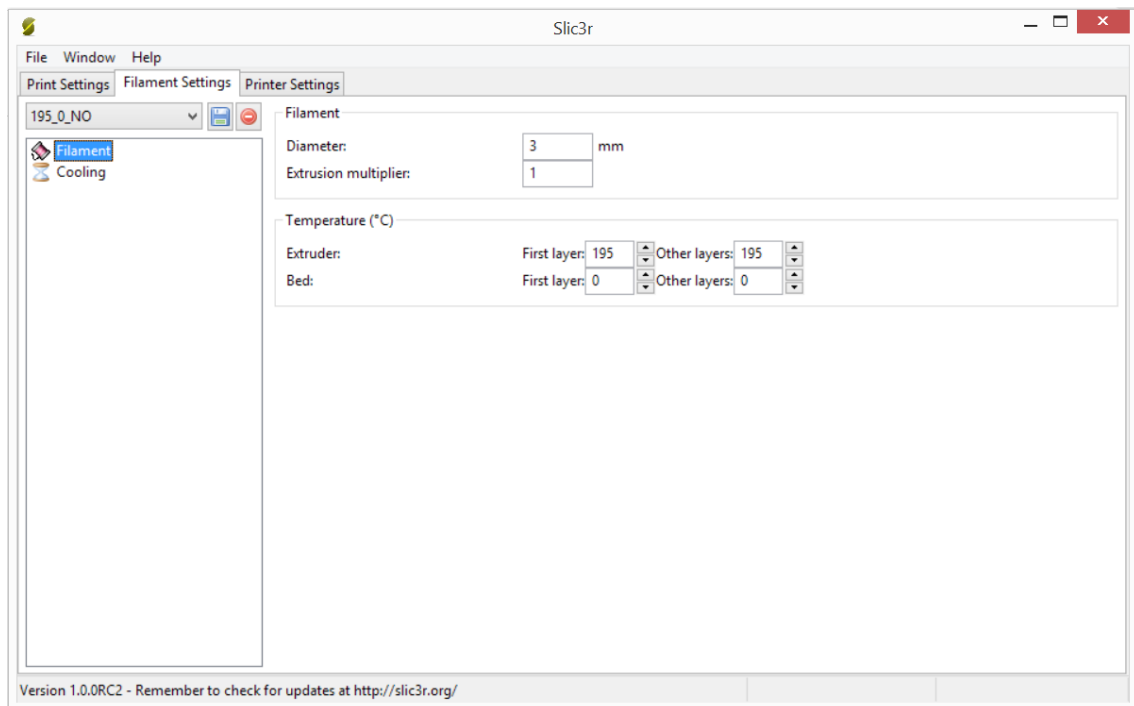


*Ilustración 3. Configuraciones de impresora - Extrusor 1*

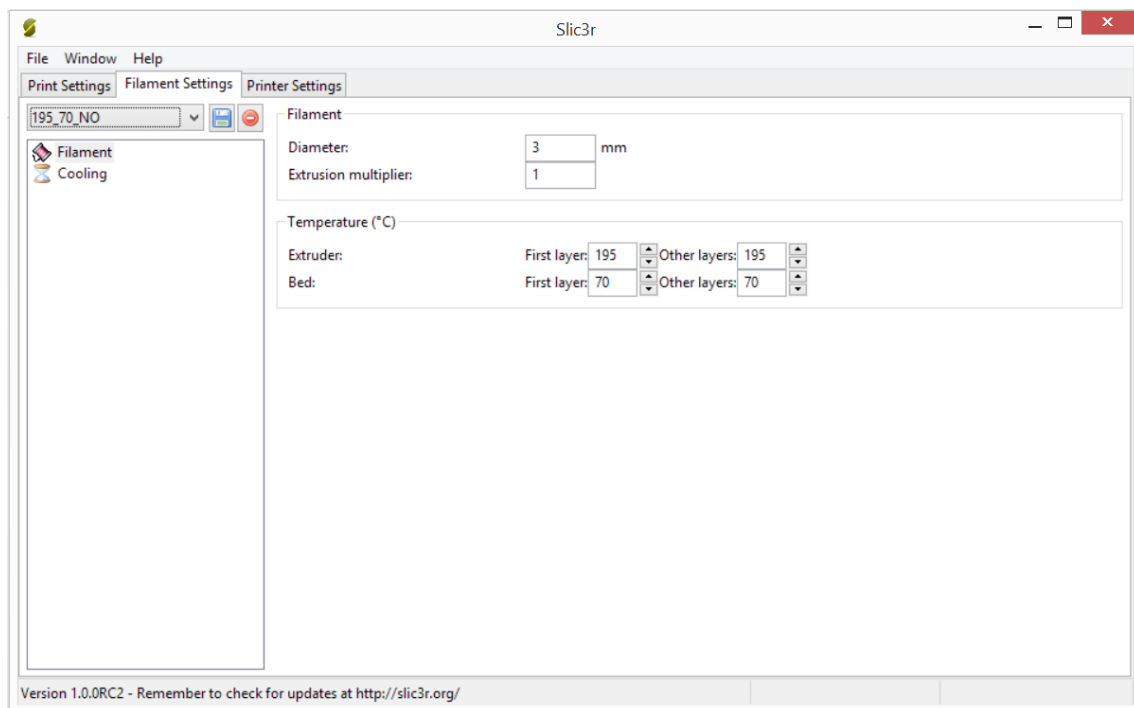
## Configuraciones del filamento

Se presentan a continuación las configuraciones de diámetro de filamento y temperaturas. (Ilustración 4 e Ilustración 5).





*Ilustración 4. Extrusor a 195°C y base a temperatura ambiente*



*Ilustración 5. Extrusor a 195°C y base a 70°C*

Se omiten las capturas de configuración de filamento con el extrusor a 215°C por ser análogas a las de temperatura 195°C.

### Configuraciones de impresión

Todas las configuraciones de este bloque, excepto las de velocidad, fueron iguales para todas las muestras (*Ilustración 6, Ilustración 7 e Ilustración 8*).

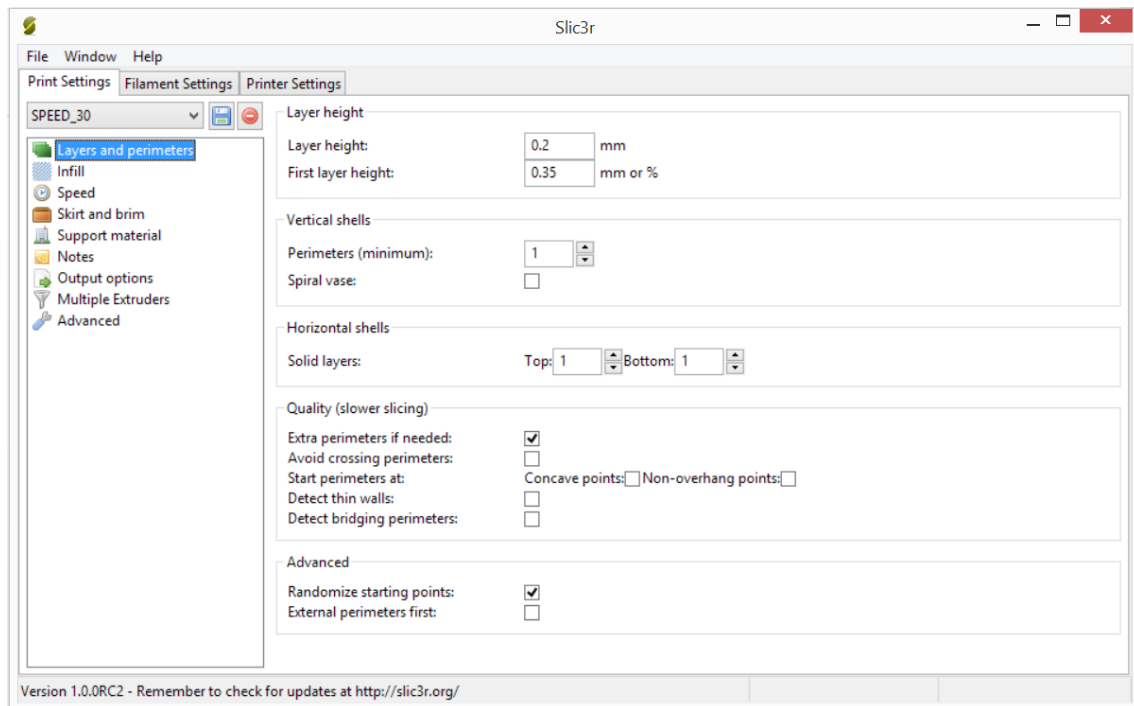


Ilustración 6. Configuración de capas y perímetros

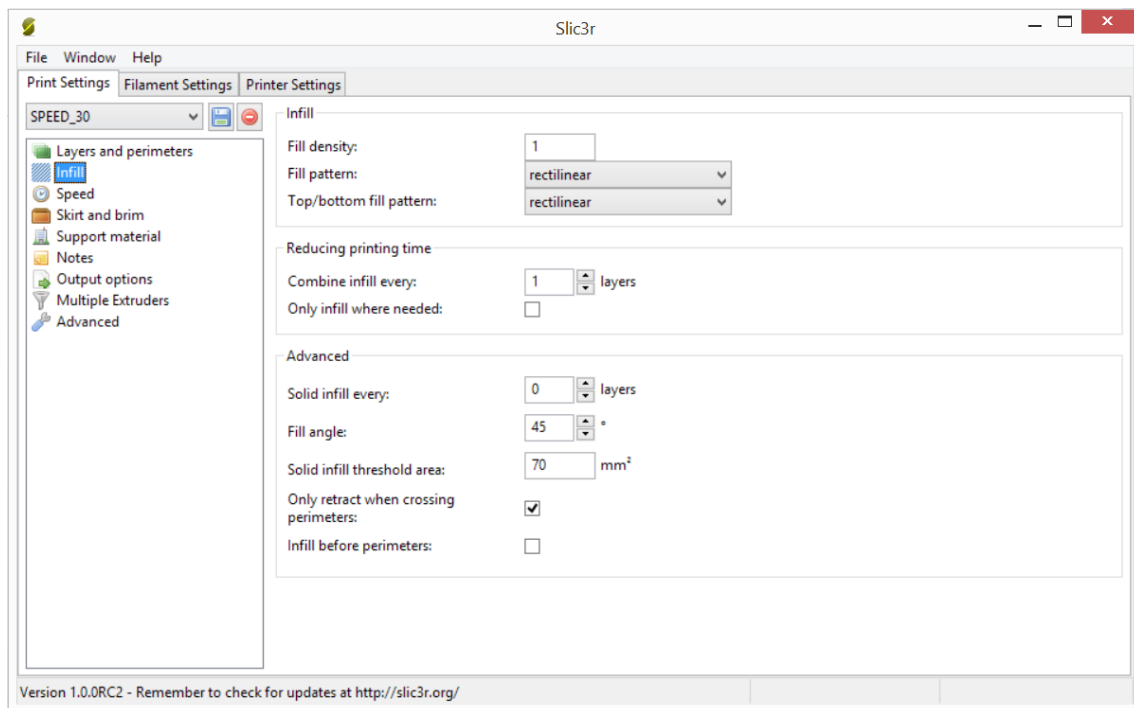


Ilustración 7. Configuración de relleno

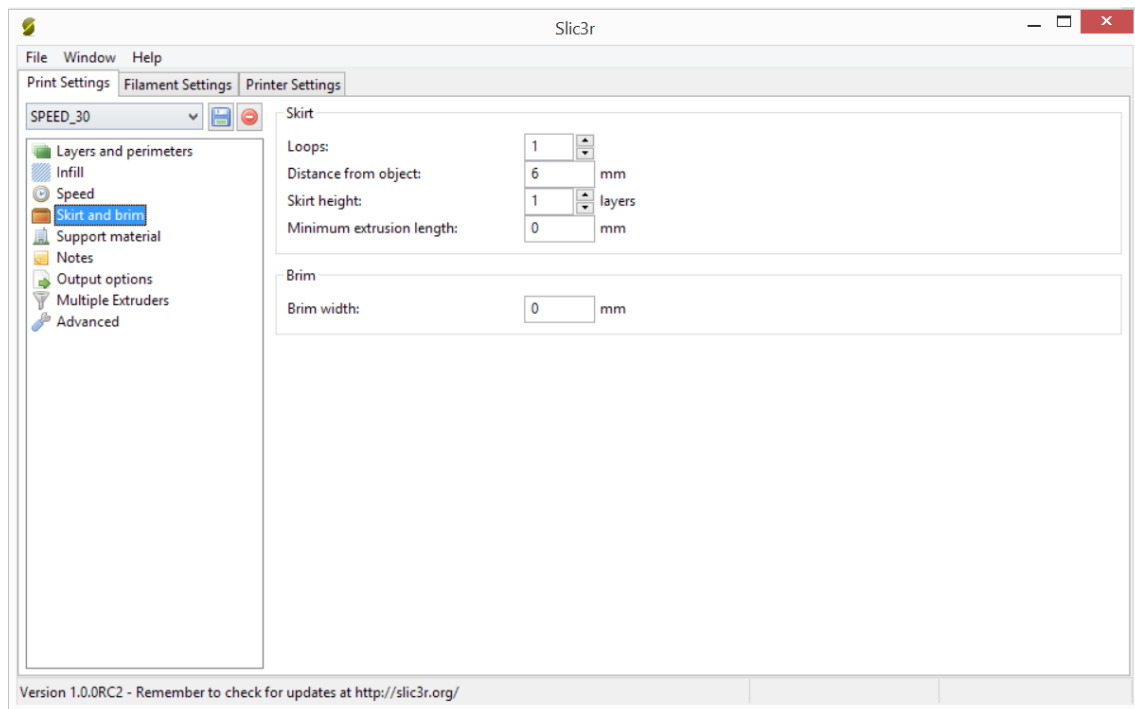


Ilustración 8. Configuración de falda y borde

En el resto de apartados, desde material de soporte hasta avanzado (desde *Support material* hasta *Advanced*), se dejaron asignados los valores por defecto, por lo que se omitirán las capturas.

Se presentan a continuación las dos configuraciones de velocidad empleadas.

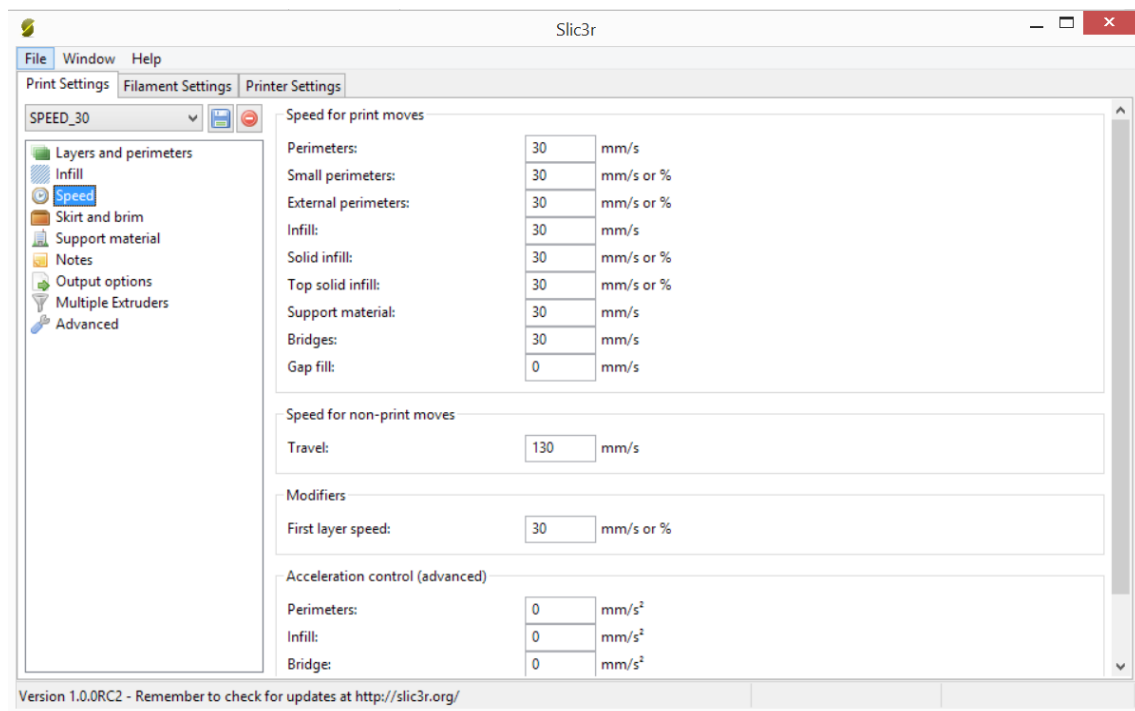


Ilustración 9. Configuración de velocidad (valor inferior - 30m/s)

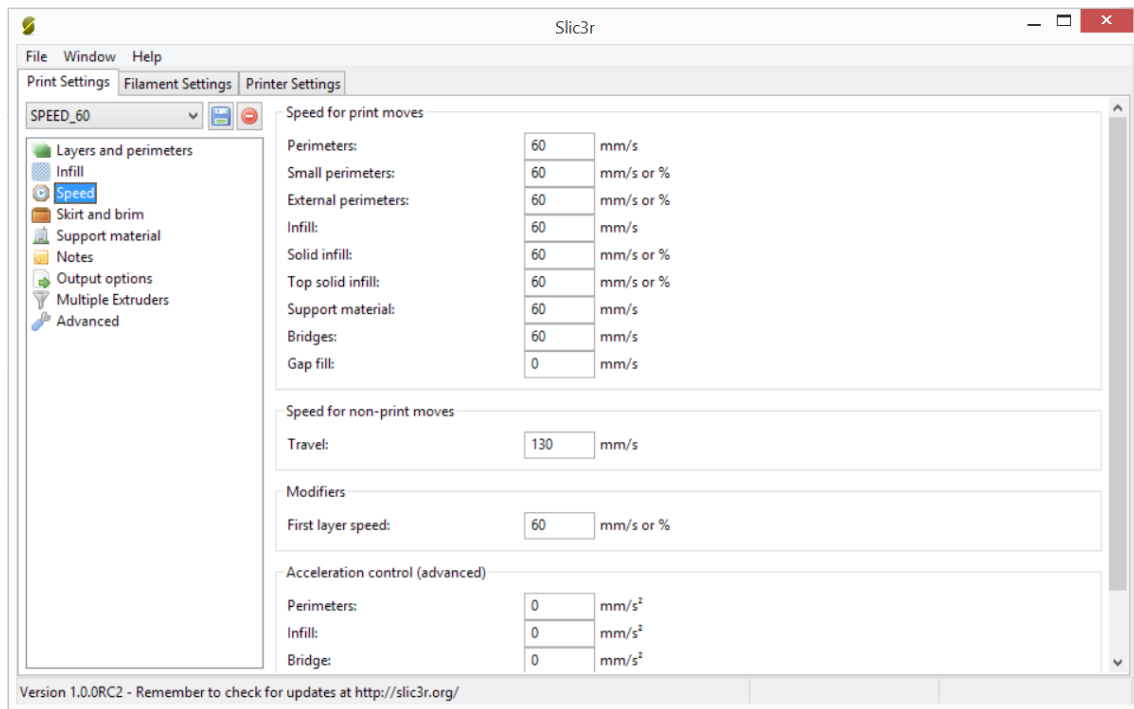
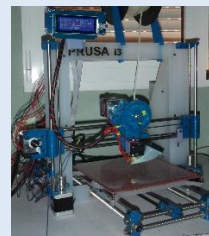


Ilustración 10. Configuración de velocidad (valor superior - 60mm/s)

# Anexo III. Lista de Materiales

Nombre :	Impresora FFF RepRap
Modelo :	Prusa i3
Assembly Revision :	Single Plate mod.
Part Count :	19
Total Cost :	400,34 €

Picture of Assembly



#	Nombre del componente	Descripción	U.	Imagen	C.U.	Coste
	Kit Electrónica	Arduino MEGA 2560 rev3, RAMPS 1.4, Endstops, Hot-bed, Pulleys, Wiring	1		€ 129,41	129,41 €
	Motores Paso a Paso	Nema 17	5		€ 9,74	48,70 €
	Hobbed-bolt	Tornillo con muescas	1		€ 4,00	4,00 €
	Correas	Tipo GT2 (1m c.u.)	2		€ 8,87	17,74 €
	Kit de rodamientos y muelles	608ZZ, 624ZZ, 4 muelles para la base, 2 para el extrusor	1		€ 19,50	19,50 €
	Tornillería y Varillas Roscadas	Tornillería y tuercas M3 y M4. Varillas roscadas M10, M8 y M5	1		€ 27,55	27,55 €
	Kit barras lisas	Barras lisas de acero de diámetro 8mm	1		€ 9,00	9,00 €
	Marco y base	Metacrilato color hielo e. 6mm (Costó 0€. Fue un favor)	1		€ 30,00	30,00 €
	Hot-end	All-metal E3D v5	1		€ 68,33	68,33 €
	Fuente de alimentación	220V/110V AC (seleccionable) a 12V DC	1		€ 16,71	16,71 €
	Cristal base impresión	Cristal 20x20 cm con las esquinas matadas de espesor 3mm	1		€ 5,00	5,00 €
	Piezas impresas	Bobina PLA azul 3.0mm (la impresión de las piezas fue un favor)	1		€ 20,00	20,00 €
	Acoples flexibles para el eje Z	5x5mm CNC Coupler	2		€ 2,20	4,40 €
<b>Total</b>			<b>19</b>			<b>400,34 €</b>



## ANEXO IV

### DIMENSIONES DE LAS PROBETAS Y ANÁLISIS VISUAL

EXPERIMENTO #1 - CÓDIGO 0									
	$l_3$ (mm)	$b_2$ (mm)	$b_1$ (mm)	$h$ (mm)	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )	Valoración visual de las tres			Comentarios
<b>PROBETA 1</b>	151,36	20,48	10,24	4,60	47,10	Baja	Med.	Alta	<i>1 y 2: primera capa con fragmentos despegados por pegarse a la base de impresión.</i>
<b>PROBETA 2</b>	151,39	20,38	10,31	4,44	45,78				
<b>PROBETA 3</b>	151,79	20,40	10,68	4,28	45,71		X		
<b>Media</b>	<b>151,51</b>	<b>20,42</b>	<b>10,41</b>	<b>4,44</b>	<b>46,20</b>				

EXPERIMENTO #2 - CÓDIGO 1									
	$l_3$ (mm)	$b_2$ (mm)	$b_1$ (mm)	$h$ (mm)	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )	Valoración visual de las tres			Comentarios
<b>PROBETA 1</b>	151,46	20,70	10,15	4,43	44,96	Baja	Med.	Alta	<i>Valoración visual media-alta.</i>
<b>PROBETA 2</b>	151,59	20,55	10,75	4,34	46,66				
<b>PROBETA 3</b>	151,49	20,40	10,23	4,25	43,48		X		
<b>Media</b>	<b>151,51</b>	<b>20,55</b>	<b>10,38</b>	<b>4,34</b>	<b>45,03</b>				

EXPERIMENTO #3 - CÓDIGO 2									
	$l_3$ (mm)	$b_2$ (mm)	$b_1$ (mm)	$h$ (mm)	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )	Valoración visual de las tres			Comentarios
<b>PROBETA 1</b>	151,12	21,43	11,64	4,19	48,77	Baja	Med.	Alta	-
<b>PROBETA 2</b>	152,23	21,79	11,86	4,12	48,86				
<b>PROBETA 3</b>	152,37	21,46	11,45	4,18	47,86	X			
<b>Media</b>	<b>151,91</b>	<b>21,56</b>	<b>11,65</b>	<b>4,16</b>	<b>48,50</b>				

EXPERIMENTO #4 - CÓDIGO 3									
	$l_3$ (mm)	$b_2$ (mm)	$b_1$ (mm)	$h$ (mm)	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )	Valoración visual de las tres			Comentarios
<b>PROBETA 1</b>	152,65	21,90	11,76	4,01	47,16	Baja	Med.	Alta	<i>Apariencia muy mala.</i>
<b>PROBETA 2</b>	152,81	21,56	11,91	4,00	47,64				
<b>PROBETA 3</b>	152,44	22,19	11,97	3,99	47,76	X			
<b>Media</b>	<b>152,63</b>	<b>21,88</b>	<b>11,88</b>	<b>4,00</b>	<b>47,52</b>				

EXPERIMENTO #5 - CÓDIGO 4									
	$l_3$ (mm)	$b_2$ (mm)	$b_1$ (mm)	$h$ (mm)	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )	Valoración visual de las tres			Comentarios
<b>PROBETA 1</b>	151,06	20,44	10,11	4,73	47,82	Baja	Med.	Alta	<i>Valoración visual media-alta.</i>
<b>PROBETA 2</b>	151,22	20,11	10,10	4,46	45,05				
<b>PROBETA 3</b>	151,18	20,29	10,04	4,59	46,08		X		
<b>Media</b>	<b>151,15</b>	<b>20,28</b>	<b>10,08</b>	<b>4,59</b>	<b>46,32</b>				

EXPERIMENTO #6 - CÓDIGO 5									
	$l_3$ (mm)	$b_2$ (mm)	$b_1$ (mm)	$h$ (mm)	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )	Valoración visual de las tres			Comentarios
<b>PROBETA 1</b>	151,24	20,45	10,21	4,43	45,23	Baja	Med.	Alta	<i>Apariencia muy buena.</i>
<b>PROBETA 2</b>	151,25	20,36	10,14	4,31	43,70				
<b>PROBETA 3</b>	151,34	20,49	10,20	4,35	44,37			X	
<b>Media</b>	<b>151,28</b>	<b>20,43</b>	<b>10,18</b>	<b>4,36</b>	<b>44,43</b>				

EXPERIMENTO #7 - CÓDIGO 6									
	$l_3$ (mm)	$b_2$ (mm)	$b_1$ (mm)	$h$ (mm)	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )	Valoración visual de las tres			Comentarios
<b>PROBETA 1</b>	151,64	20,72	10,31	4,54	46,81	Baja	Med.	Alta	-
<b>PROBETA 2</b>	151,65	20,44	10,19	4,40	44,84				
<b>PROBETA 3</b>	151,68	20,81	10,34	4,45	46,01		X		
<b>Media</b>	<b>151,66</b>	<b>20,66</b>	<b>10,28</b>	<b>4,46</b>	<b>45,89</b>				

EXPERIMENTO #8 - CÓDIGO 7									
	$l_3$ (mm)	$b_2$ (mm)	$b_1$ (mm)	$h$ (mm)	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )	Valoración visual de las tres			Comentarios
<b>PROBETA 1</b>	151,47	20,68	10,33	4,44	45,87	Baja	Med.	Alta	-
<b>PROBETA 2</b>	151,58	20,91	10,24	4,40	45,06				
<b>PROBETA 3</b>	151,62	20,82	10,31	4,48	46,19		X		
<b>Media</b>	<b>151,56</b>	<b>20,80</b>	<b>10,29</b>	<b>4,44</b>	<b>45,70</b>				

EXPERIMENTO #9 - CÓDIGO 8									
	$l_3$ (mm)	$b_2$ (mm)	$b_1$ (mm)	$h$ (mm)	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )	Valoración visual de las tres			Comentarios
<b>PROBETA 1</b>	151,86	20,82	10,97	4,28	46,95	Baja	Med.	Alta	-
<b>PROBETA 2</b>	151,51	20,39	10,40	4,50	46,80				
<b>PROBETA 3</b>	151,45	20,67	10,27	4,54	46,63		X		
<b>Media</b>	<b>151,61</b>	<b>20,63</b>	<b>10,55</b>	<b>4,44</b>	<b>46,79</b>				

EXPERIMENTO #10 - CÓDIGO 9									
	$l_3$ (mm)	$b_2$ (mm)	$b_1$ (mm)	$h$ (mm)	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )	Valoración visual de las tres			Comentarios
<b>PROBETA 1</b>	151,38	20,40	10,48	4,44	46,53	Baja	Med.	Alta	<i>Valoración visual media-alta.</i>
<b>PROBETA 2</b>	151,69	20,75	10,78	4,28	46,14				
<b>PROBETA 3</b>	151,49	20,33	10,22	4,52	46,19		X		
<b>Media</b>	<b>151,52</b>	<b>20,49</b>	<b>10,49</b>	<b>4,41</b>	<b>46,29</b>				



EXPERIMENTO #11 - CÓDIGO A									
	l <sub>3</sub> (mm)	b <sub>2</sub> (mm)	b <sub>1</sub> (mm)	h (mm)	A <sub>0</sub> (mm <sup>2</sup> )	Valoración visual de las tres			Comentarios
PROBETA 1	151,81	21,09	10,76	4,44	47,77	Baja	Med.	Alta	-
PROBETA 2	151,73	20,63	10,27	4,62	47,45		X		
PROBETA 3	151,74	21,02	10,22	4,69	47,93				
Media	151,76	20,91	10,42	4,58	47,72				

EXPERIMENTO #12 - CÓDIGO B									
	l <sub>3</sub> (mm)	b <sub>2</sub> (mm)	b <sub>1</sub> (mm)	h (mm)	A <sub>0</sub> (mm <sup>2</sup> )	Valoración visual de las tres			Comentarios
PROBETA 1	151,82	20,76	10,30	4,55	46,87	Baja	Med.	Alta	Valoración visual media-baja.
PROBETA 2	151,76	20,90	10,62	4,45	47,26		X		
PROBETA 3	151,83	20,95	10,39	4,66	48,42				
Media	151,80	20,87	10,44	4,55	47,51				

EXPERIMENTO #13 - CÓDIGO C									
	l <sub>3</sub> (mm)	b <sub>2</sub> (mm)	b <sub>1</sub> (mm)	h (mm)	A <sub>0</sub> (mm <sup>2</sup> )	Valoración visual de las tres			Comentarios
PROBETA 1	151,32	20,56	10,22	4,56	46,60	Baja	Med.	Alta	Valoración visual media-alta.
PROBETA 2	151,34	20,27	10,12	4,69	47,46		X		
PROBETA 3	151,23	20,30	10,21	4,76	48,60				
Media	151,30	20,38	10,18	4,67	47,56				

EXPERIMENTO #14 - CÓDIGO D									
	l <sub>3</sub> (mm)	b <sub>2</sub> (mm)	b <sub>1</sub> (mm)	h (mm)	A <sub>0</sub> (mm <sup>2</sup> )	Valoración visual de las tres			Comentarios
PROBETA 1	151,48	20,55	10,13	4,43	44,88	Baja	Med.	Alta	Valoración visual media-muy alta.
PROBETA 2	151,19	20,51	10,15	4,72	47,91		X		
PROBETA 3	151,29	20,11	10,09	4,56	46,01				
Media	151,32	20,39	10,12	4,57	46,26				

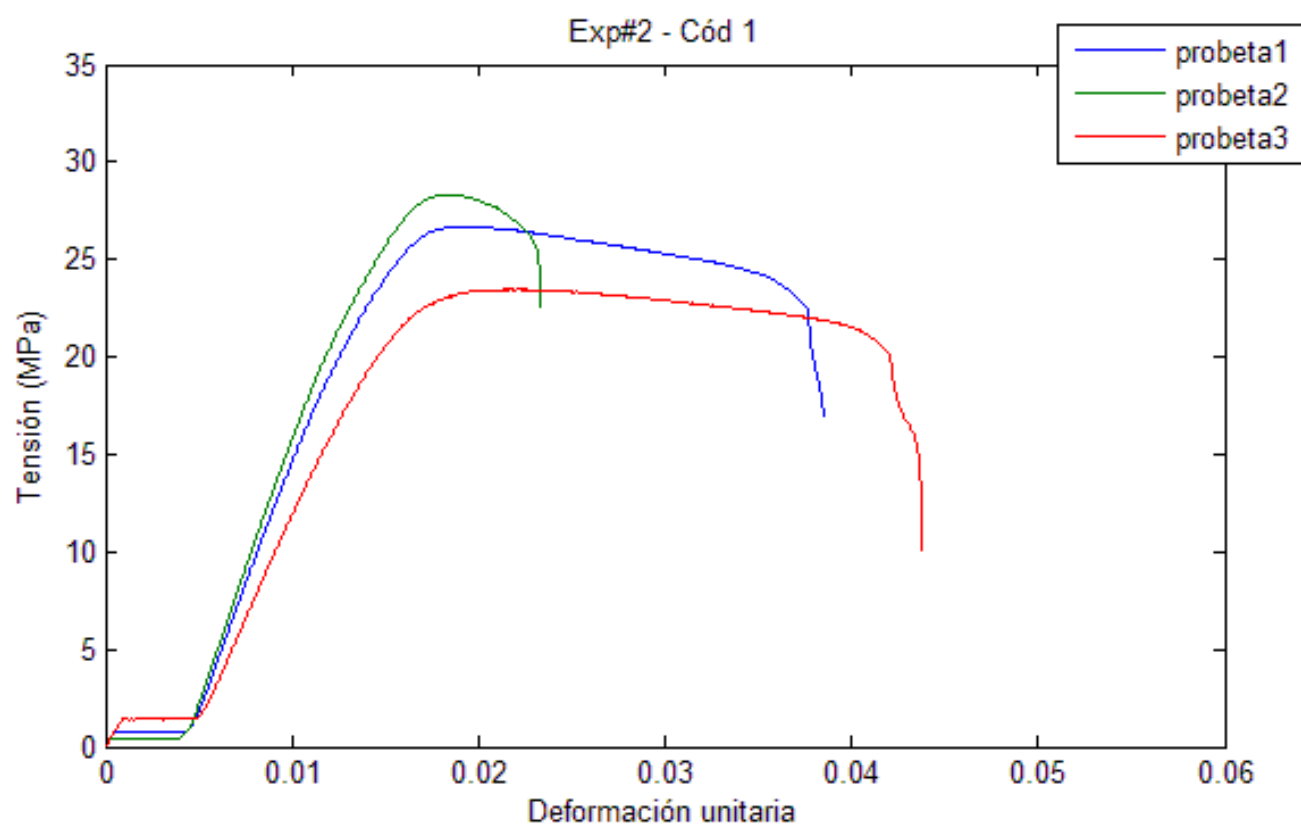
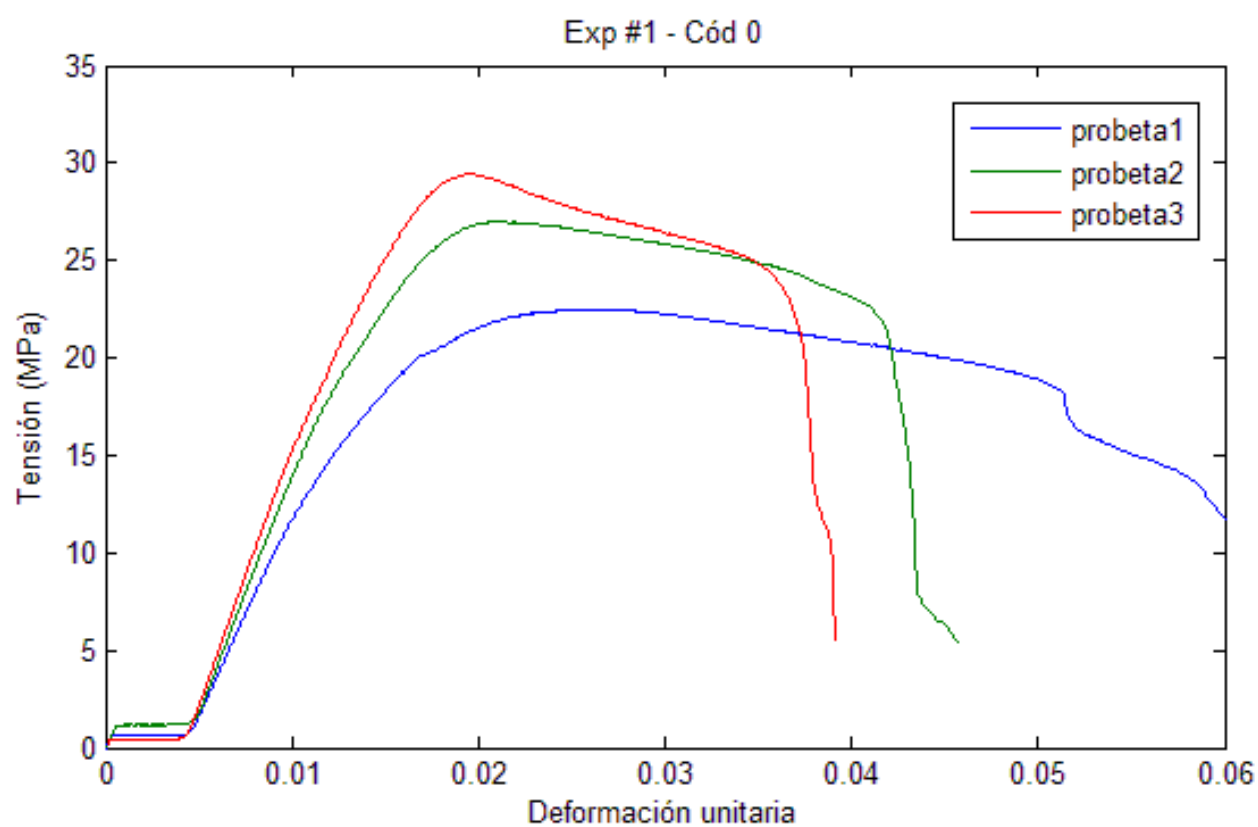
EXPERIMENTO #15 - CÓDIGO E									
	l <sub>3</sub> (mm)	b <sub>2</sub> (mm)	b <sub>1</sub> (mm)	h (mm)	A <sub>0</sub> (mm <sup>2</sup> )	Valoración visual de las tres			Comentarios
PROBETA 1	151,64	20,15	10,15	4,72	47,91	Baja	Med.	Alta	-
PROBETA 2	151,64	20,44	10,23	4,82	49,31		X		
PROBETA 3	151,60	20,66	10,29	4,64	47,75				
Media	151,63	20,42	10,22	4,73	48,32				

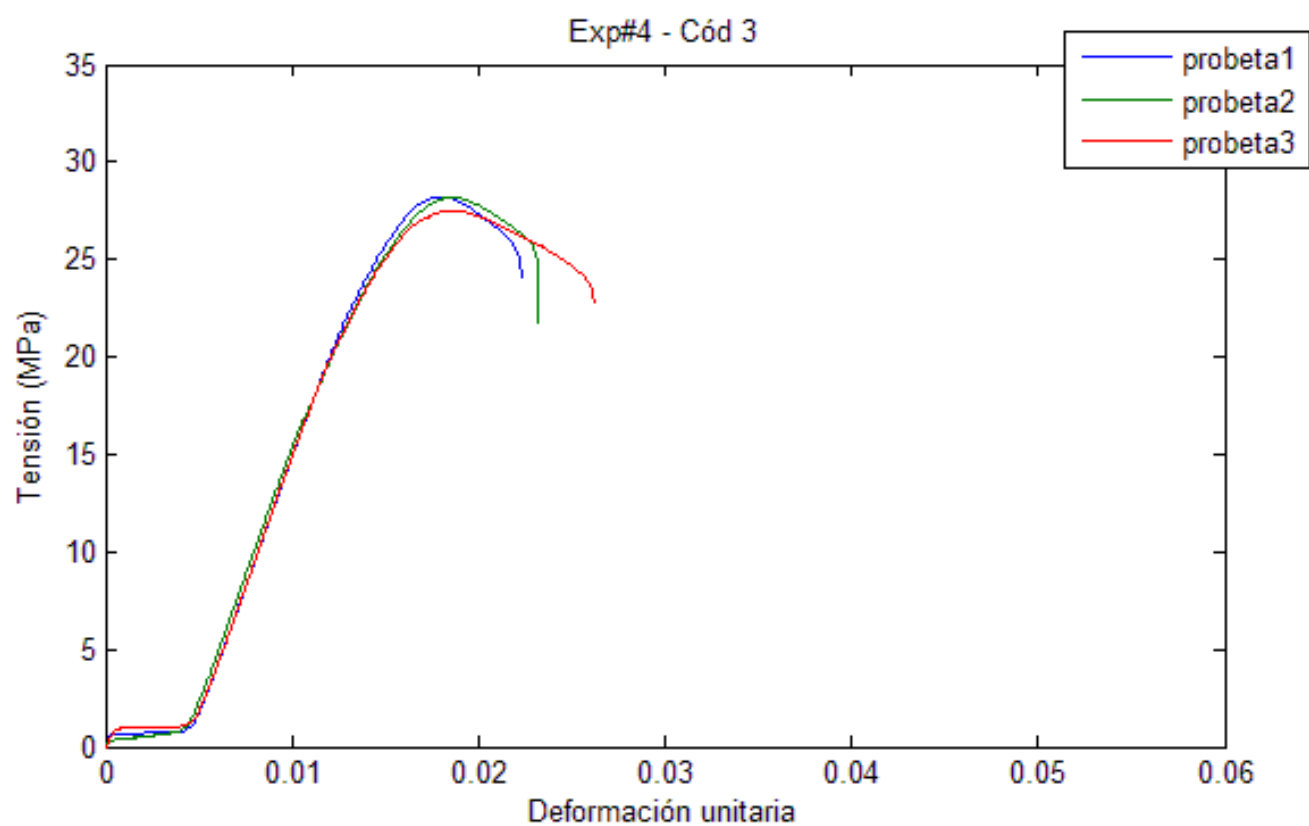
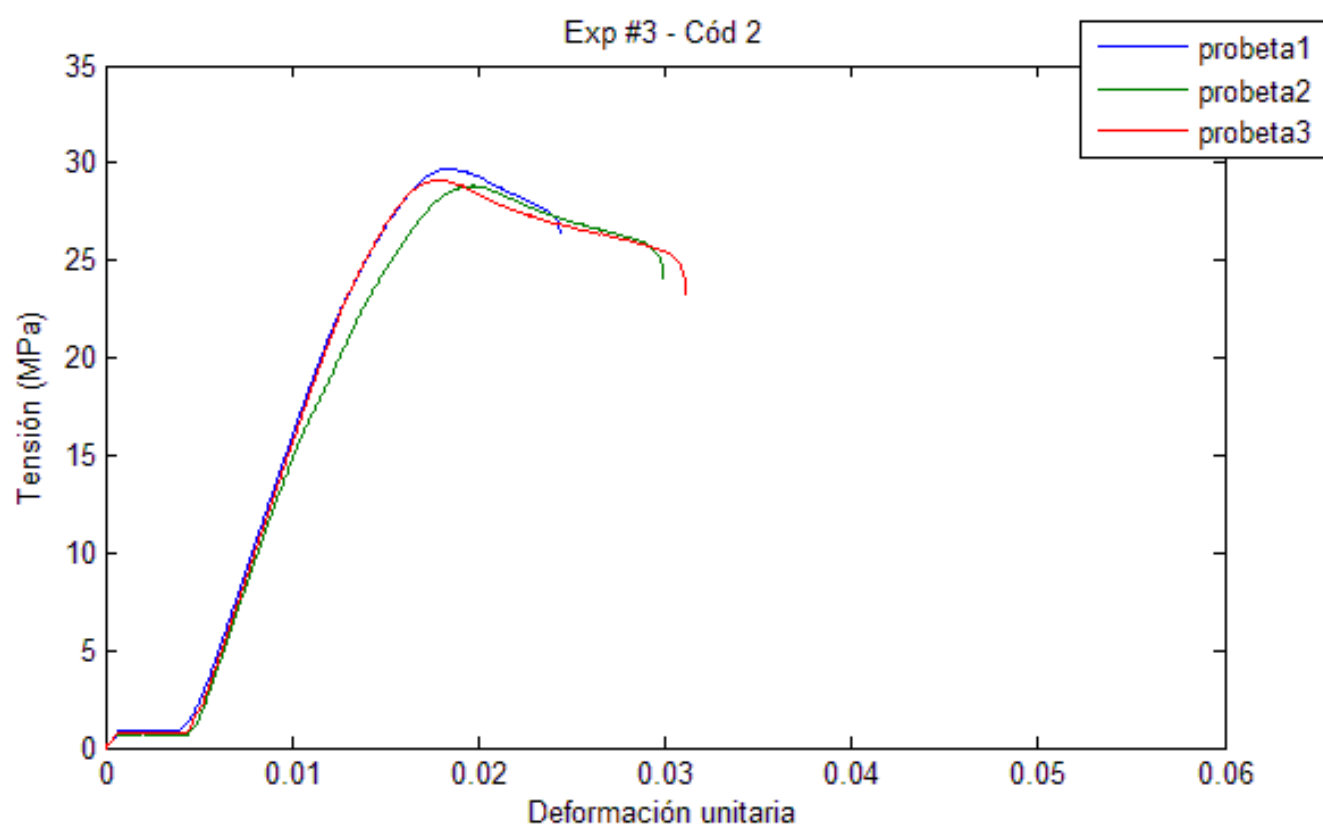
EXPERIMENTO #16 - CÓDIGO F									
	l <sub>3</sub> (mm)	b <sub>2</sub> (mm)	b <sub>1</sub> (mm)	h (mm)	A <sub>0</sub> (mm <sup>2</sup> )	Valoración visual de las tres			Comentarios
PROBETA 1	151,92	20,73	10,39	4,64	48,21	Baja	Med.	Alta	-
PROBETA 2	151,74	20,79	10,24	4,66	47,72		X		
PROBETA 3	151,08	20,72	10,42	4,70	48,97				
Media	151,58	20,75	10,35	4,67	48,30				

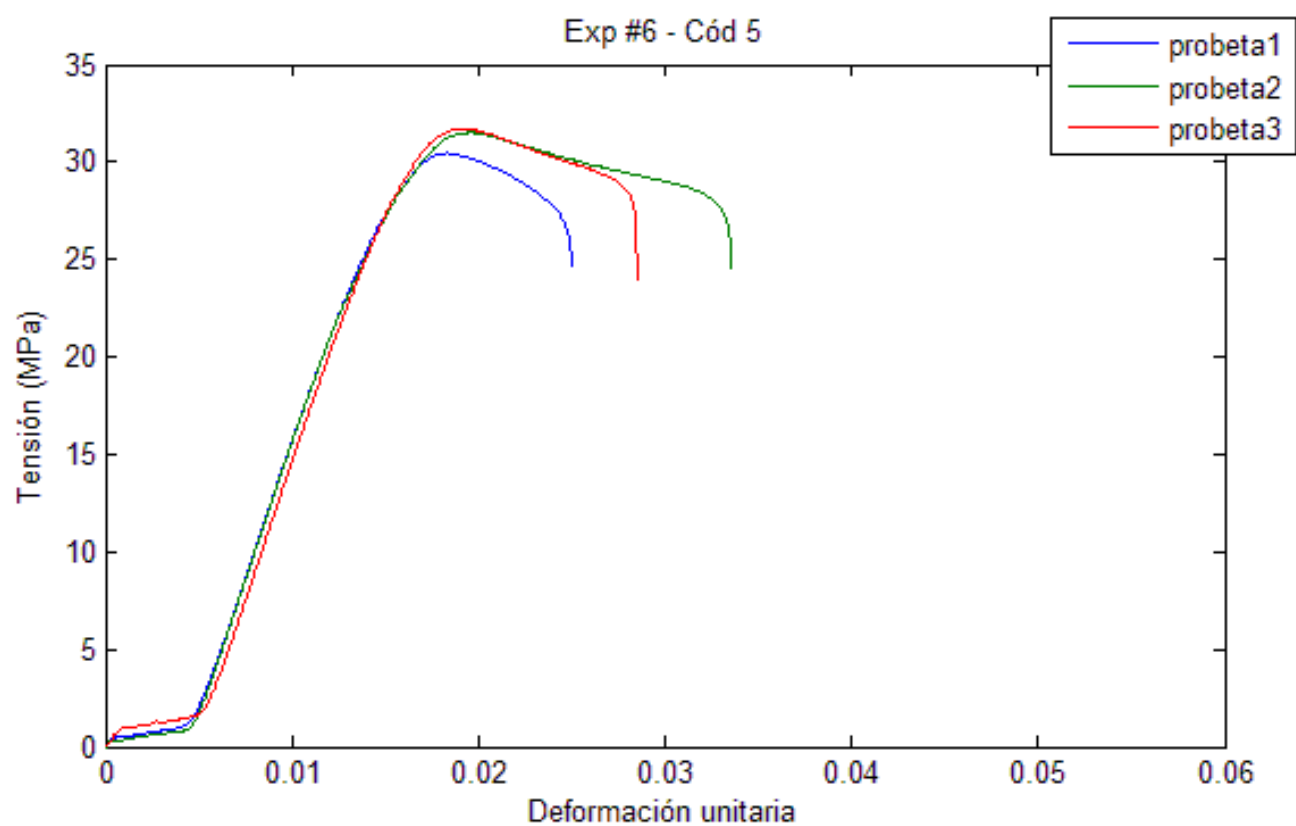
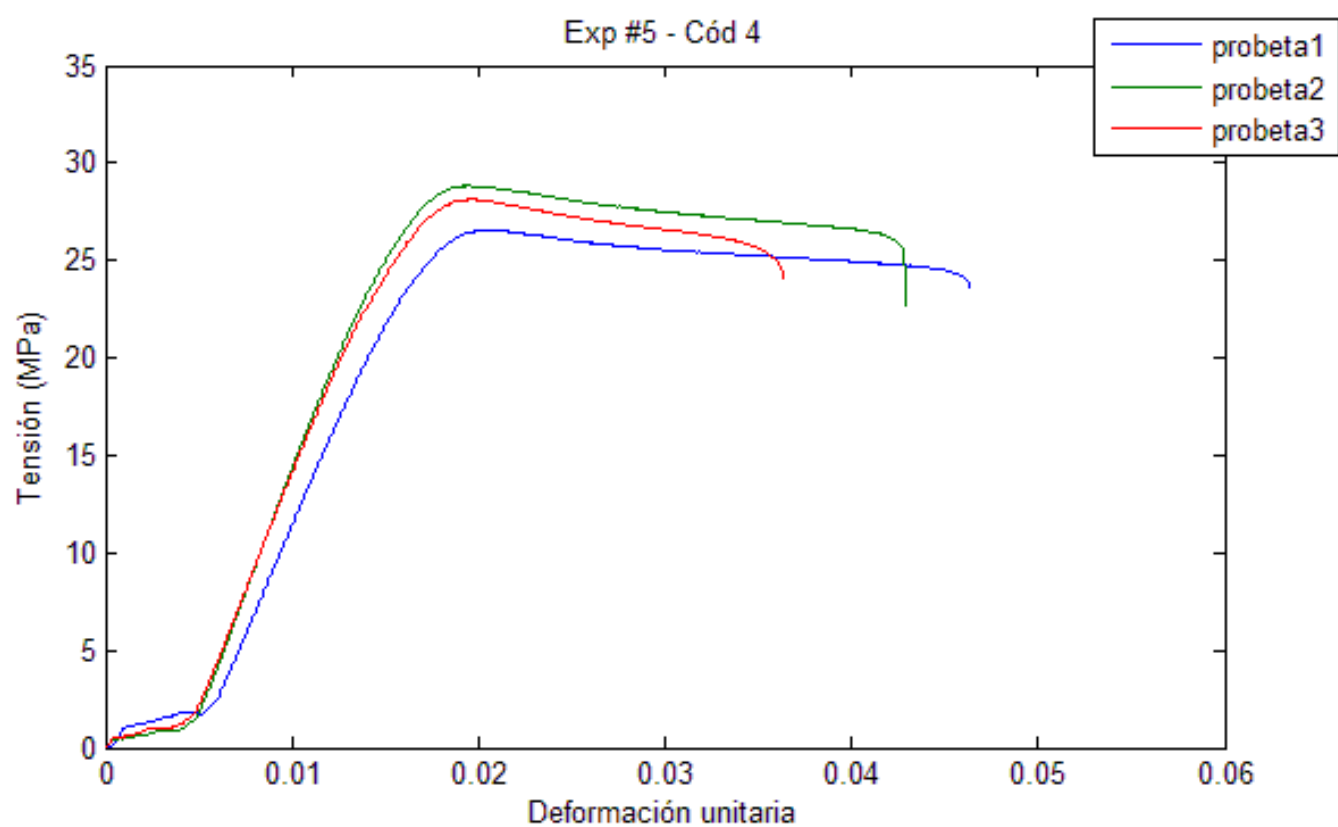
## ANEXO V

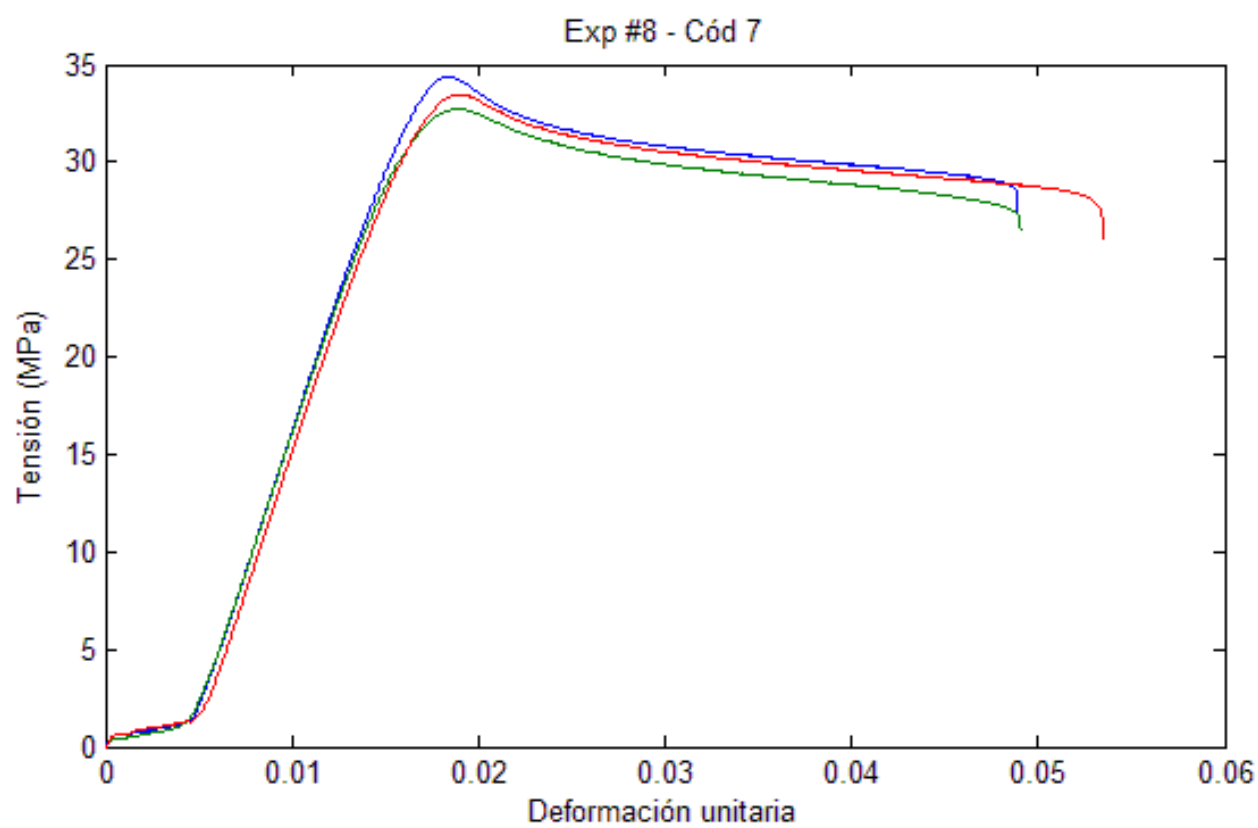
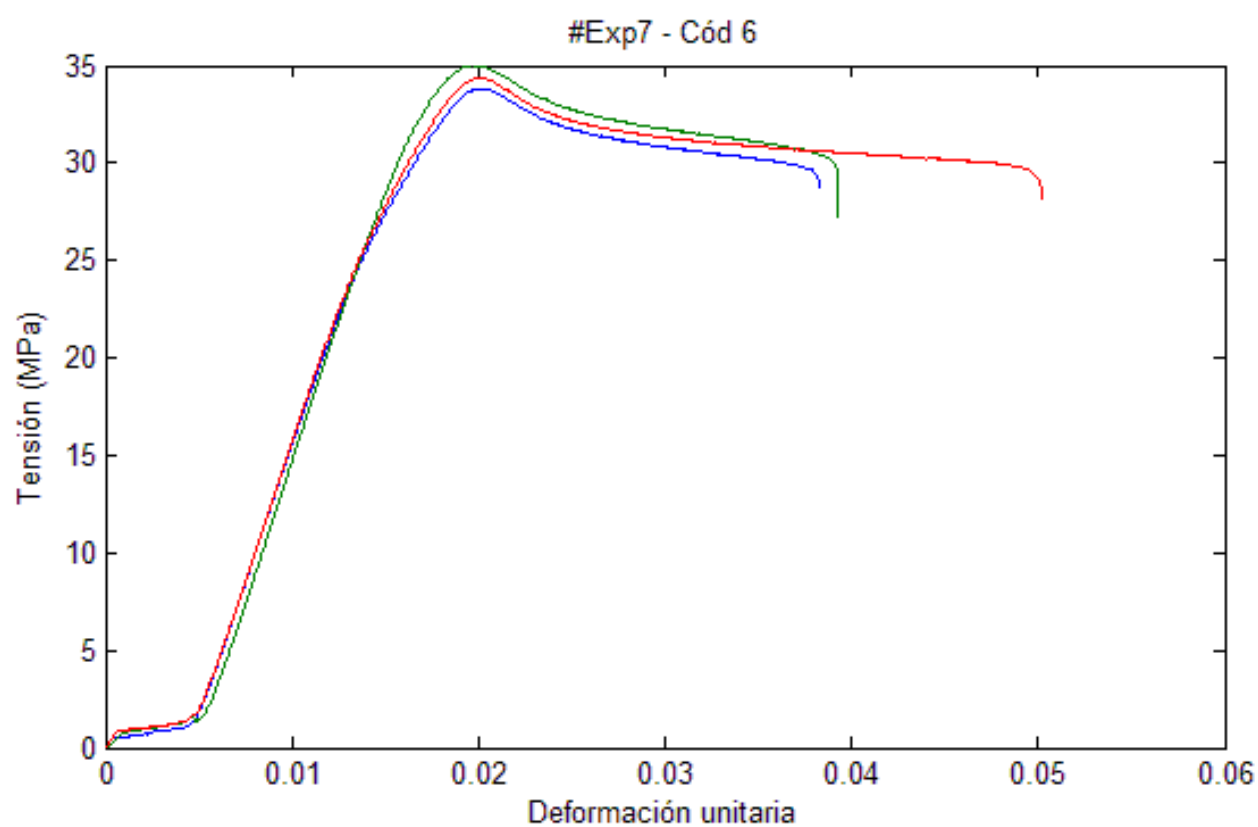
### Curvas esfuerzo-deformación



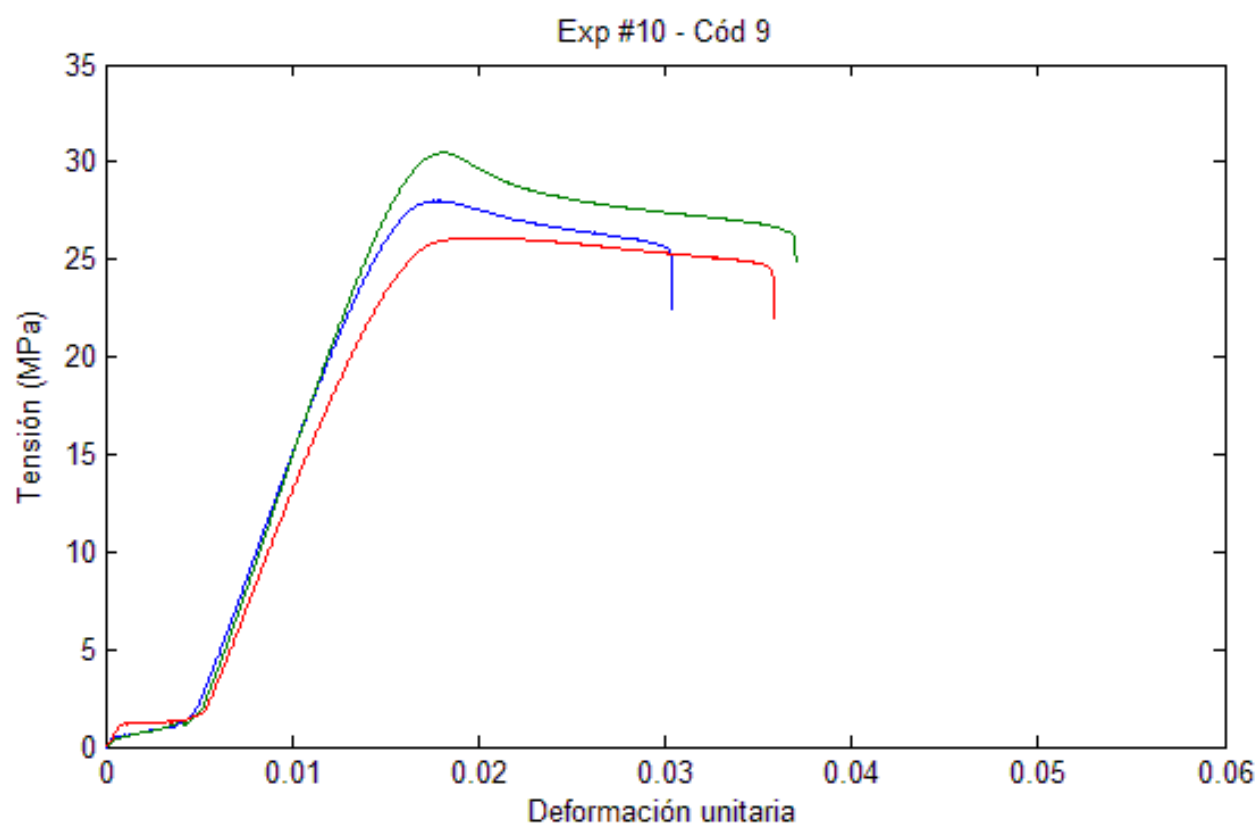
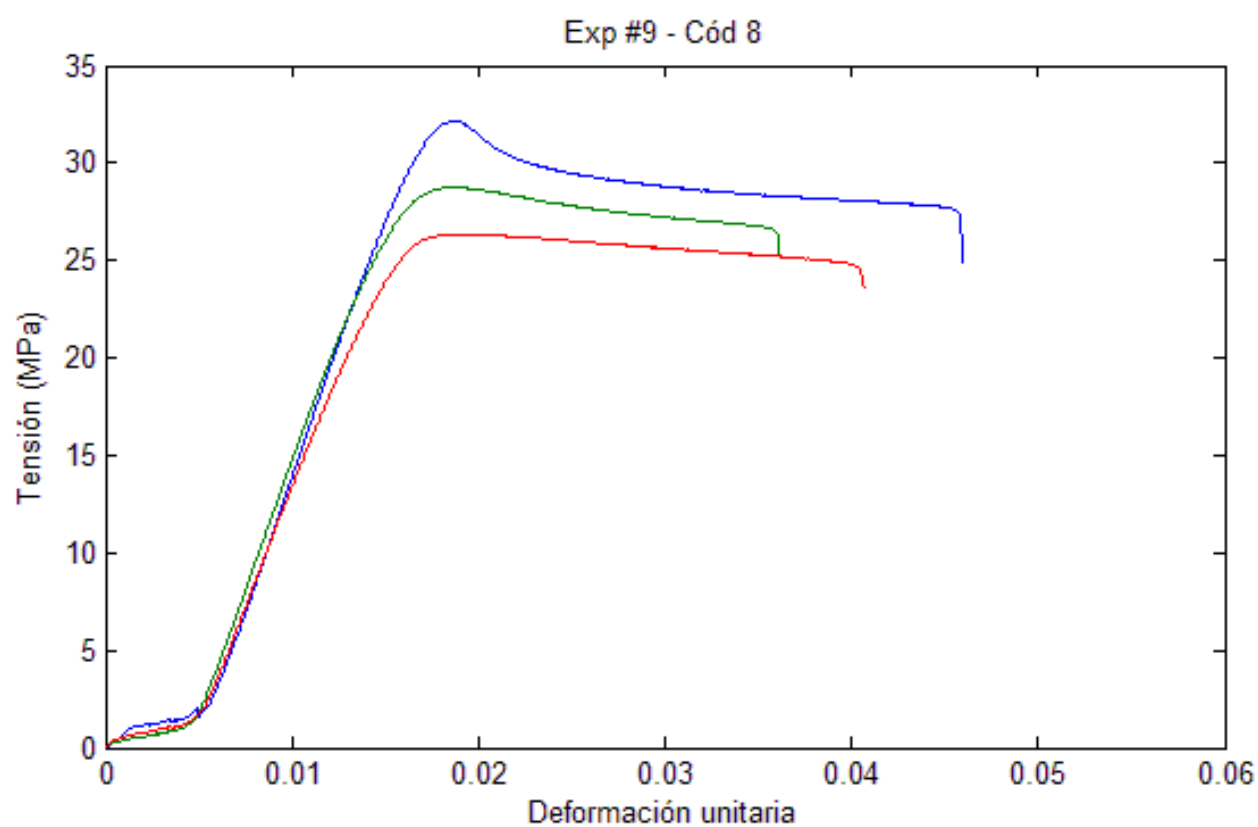


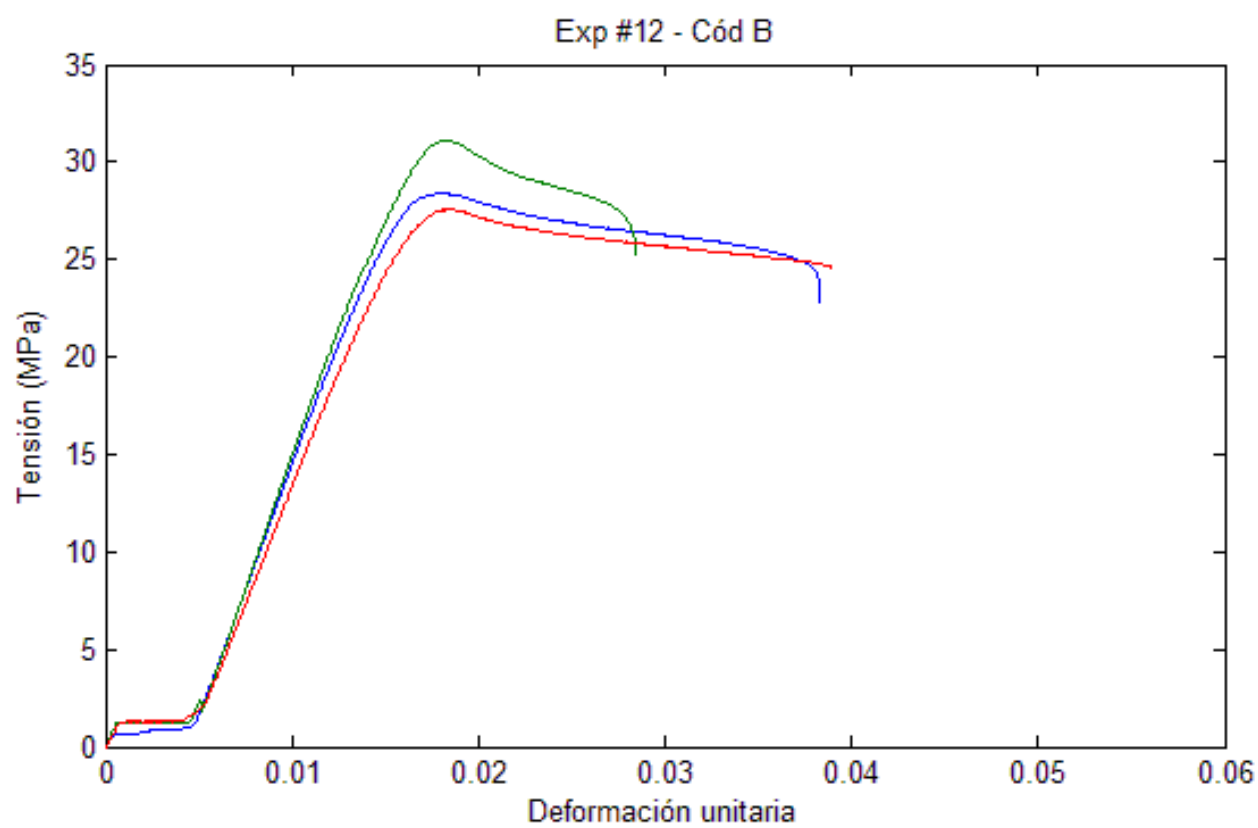
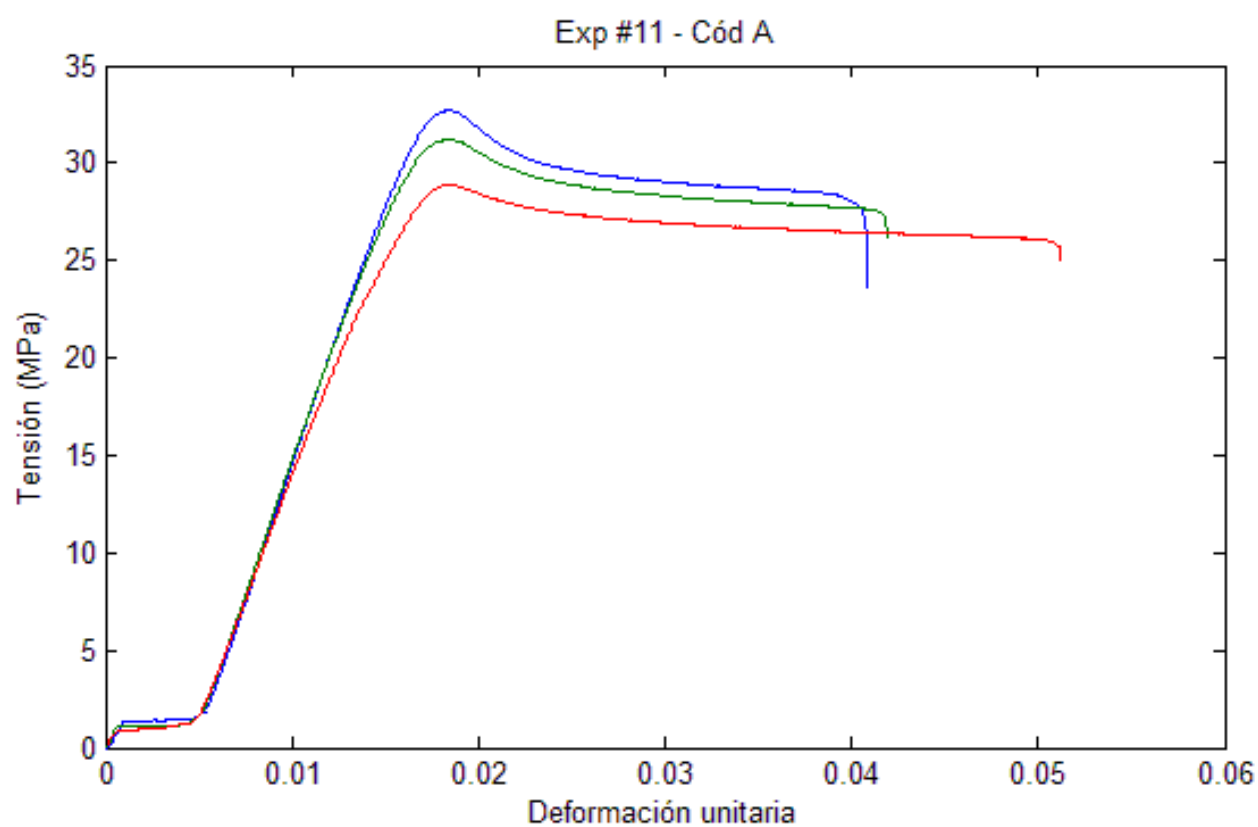


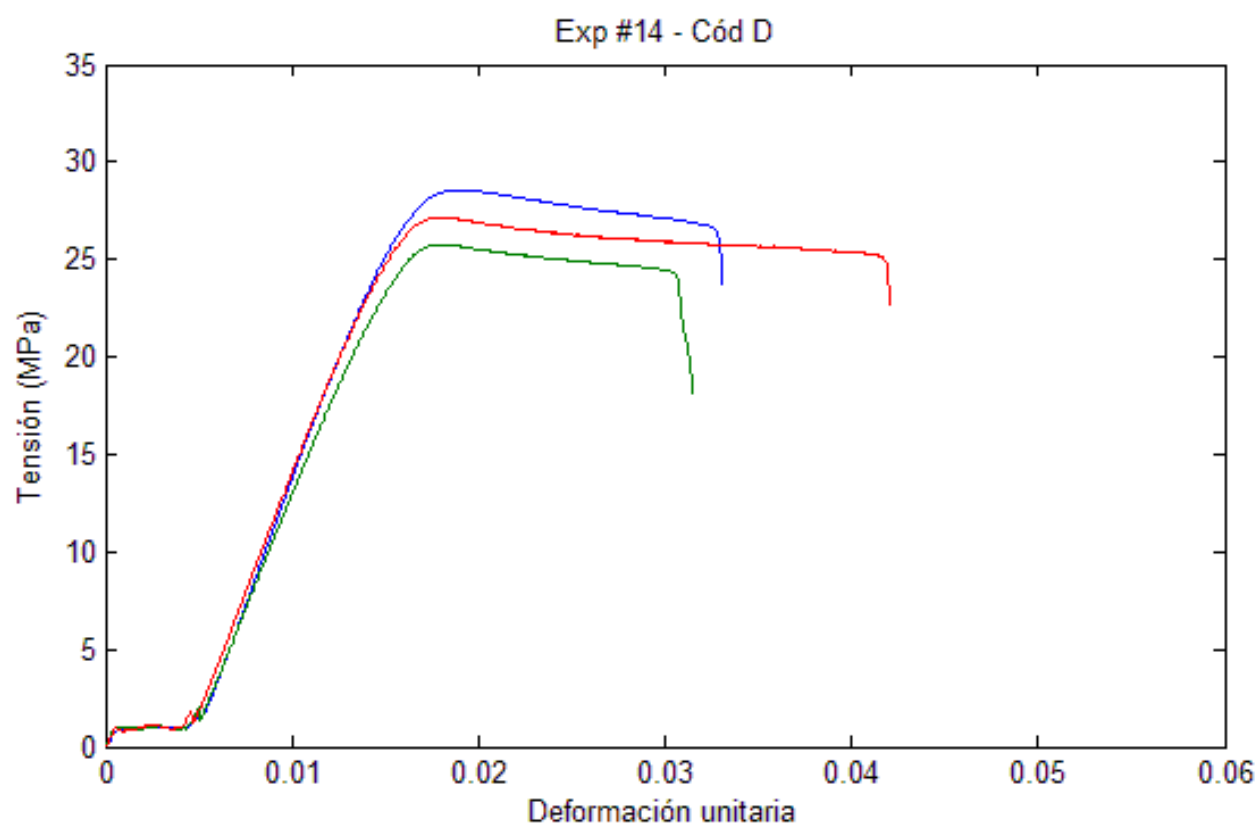
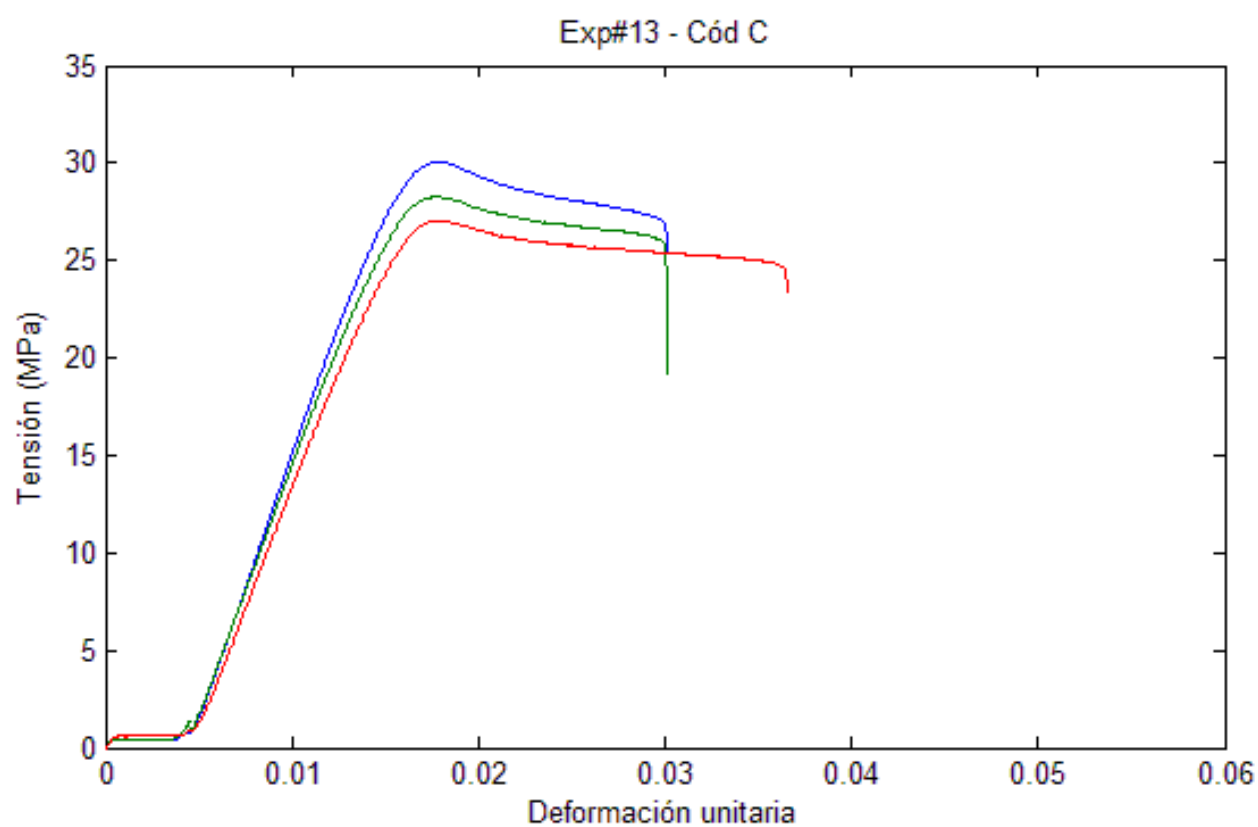


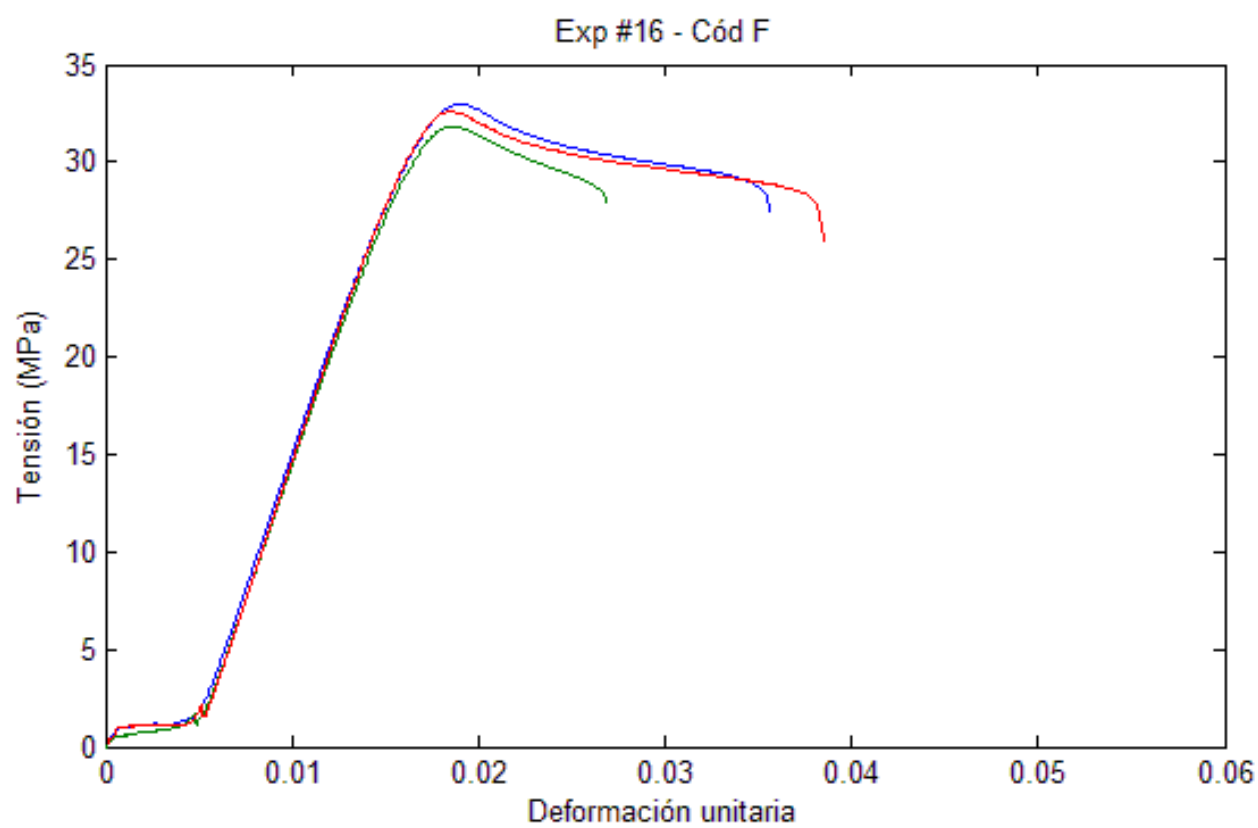
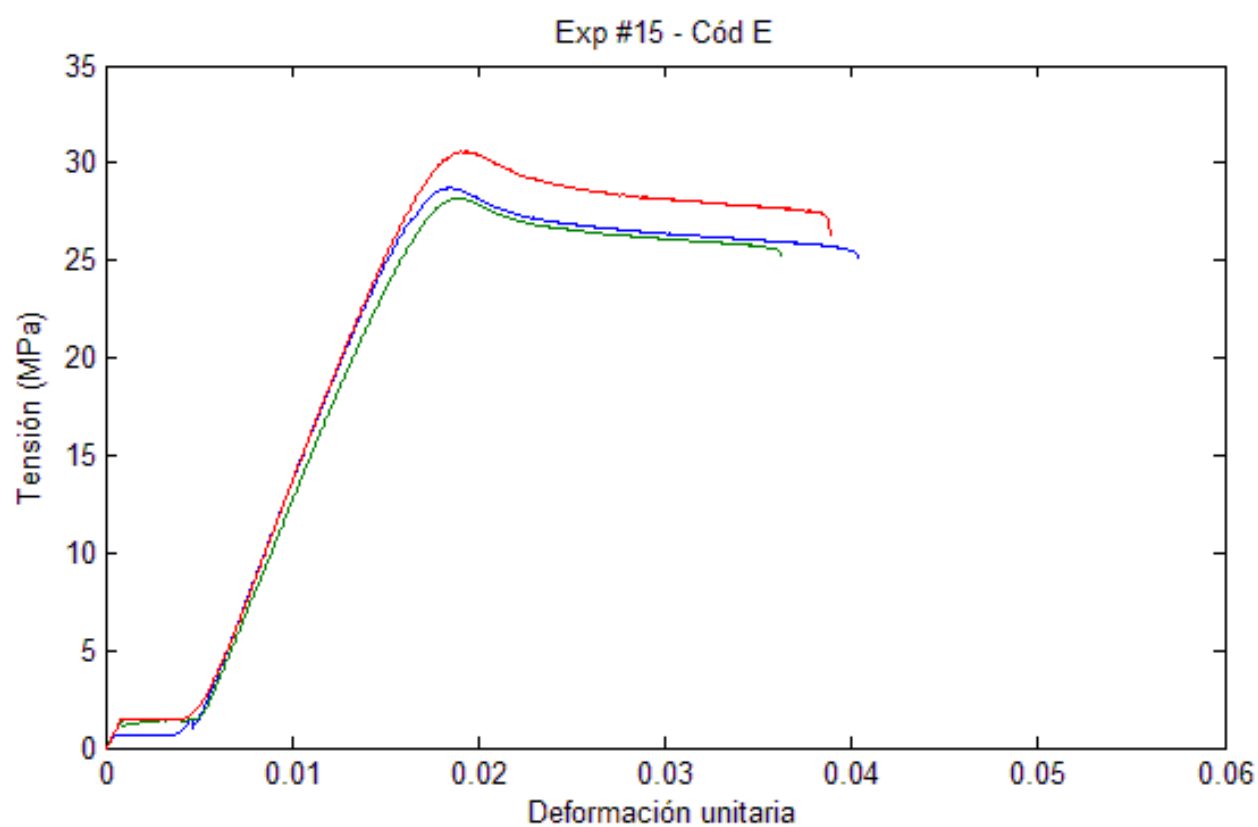












## ANEXO VI

### Datos de los ensayos a tracción

Núm - Cód	Probeta	$\sigma_{MÁX}$ (MPa)	$\epsilon_{MÁX}$ (unit.)	$\sigma_{MÁX}$ media (MPa)	$\epsilon_{MÁX}$ media (unit.)	$\sigma_{MÁX}$ D.S. (MPa)	$\epsilon_{MÁX}$ D.S. (unit.)
#1 - 0	1	22,5009	0,0702	26,3096	0,0517	3,5217	0,0163
	2	26,9801	0,0459				
	3	29,4479	0,0391				
#2 - 1	1	26,7104	0,0385	26,1774	0,0352	2,4833	0,0106
	2	28,3509	0,0233				
	3	23,4709	0,0437				
#3 - 2	1	29,7096	0,0244	29,2163	0,0285	0,4477	0,0036
	2	28,8358	0,0299				
	3	29,1034	0,0311				
#4 - 3	1	28,2348	0,0223	27,9827	0,0239	0,4057	0,0020
	2	28,1987	0,0232				
	3	27,5147	0,0262				
#5 - 4	1	26,5611	0,0463	27,8477	0,0419	1,1689	0,0051
	2	28,8440	0,0429				
	3	28,1382	0,0364				
#6 - 5	1	30,4510	0,0250	31,2196	0,0290	0,6708	0,0043
	2	31,5212	0,0335				
	3	31,6867	0,0285				
#7 - 6	1	33,8136	0,0383	34,4088	0,0426	0,6218	0,0066
	2	35,0541	0,0393				
	3	34,3588	0,0502				
#8 - 7	1	34,3707	0,0490	33,5179	0,0505	0,8257	0,0026
	2	32,7222	0,0491				
	3	33,4609	0,0535				
#9 - 8	1	32,1526	0,0459	29,0671	0,0409	2,9385	0,0049
	2	28,7469	0,0361				
	3	26,3018	0,0407				
#10 - 9	1	28,0103	0,0304	28,2017	0,0344	2,1916	0,0035
	2	30,4827	0,0370				
	3	26,1121	0,0358				
#11 - A	1	32,6915	0,0409	30,9301	0,0446	1,9198	0,0057
	2	31,2149	0,0419				
	3	28,8838	0,0512				
#12 - B	1	28,3804	0,0383	29,0273	0,0353	1,8531	0,0059
	2	31,1171	0,0285				
	3	27,5844	0,0390				
#13 - C	1	30,0861	0,0302	28,4647	0,0323	1,5328	0,0037
	2	28,2686	0,0302				
	3	27,0394	0,0366				
#14 - D	1	28,5922	0,0331	27,1721	0,0355	1,4156	0,0057
	2	25,7610	0,0314				
	3	27,1631	0,0421				
#15 - E	1	28,7349	0,0404	29,1648	0,0385	1,2572	0,0021
	2	28,1790	0,0363				
	3	30,5805	0,0389				
#16 - F	1	32,9863	0,0356	32,4680	0,0337	0,5943	0,0061
	2	31,8193	0,0269				
	3	32,5984	0,0385				



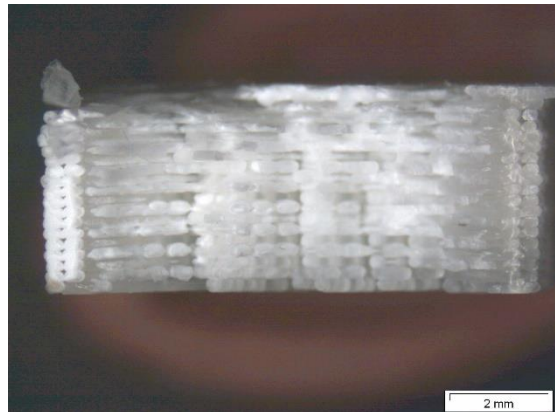
## ANEXO VII

Capturas tomadas al microscopio estereoscópico (ver *nota* al final del Anexo)

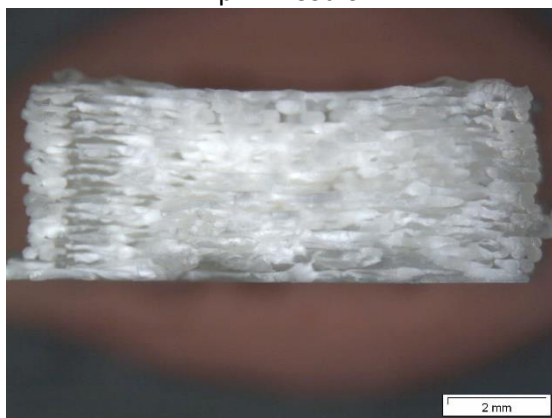
Imágenes frontales de la fractura



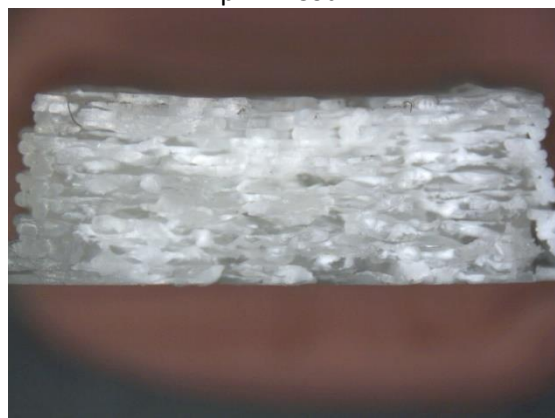
Exp #1 - Cód 0



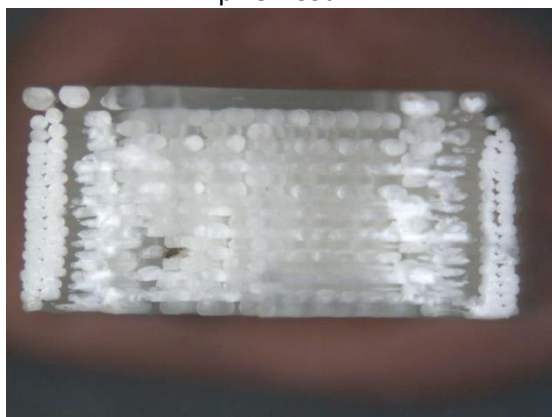
Exp #2 - Cód 1



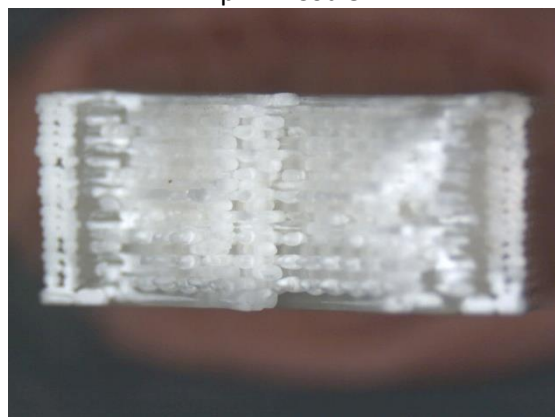
Exp #3 - Cód 2



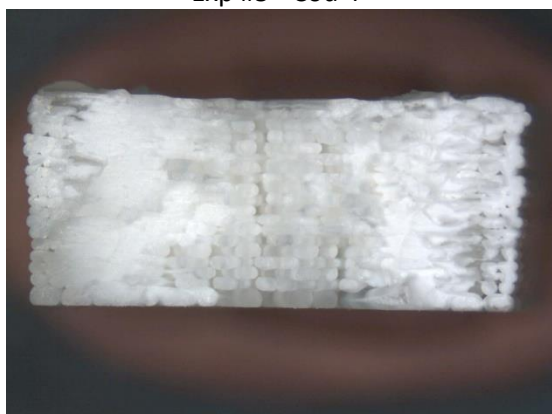
Exp #4 - Cód 3



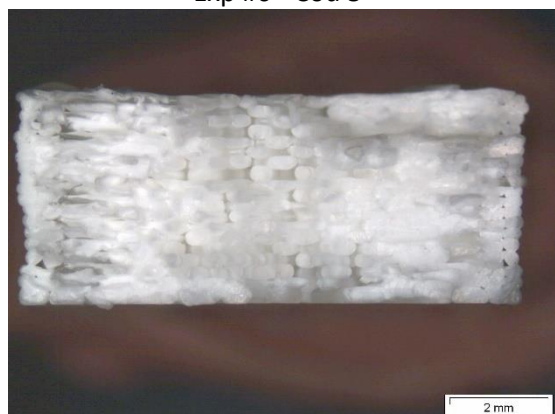
Exp #5 - Cód 4



Exp #6 - Cód 5

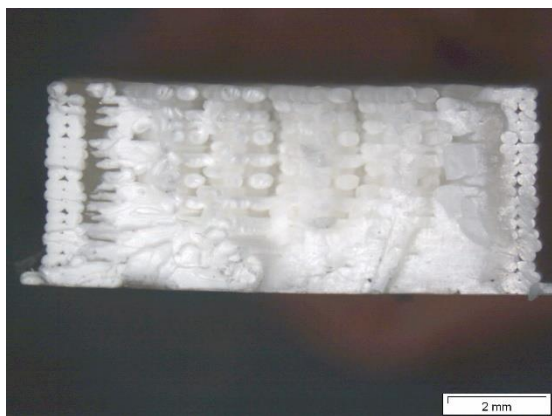


Exp #7 - Cód 6

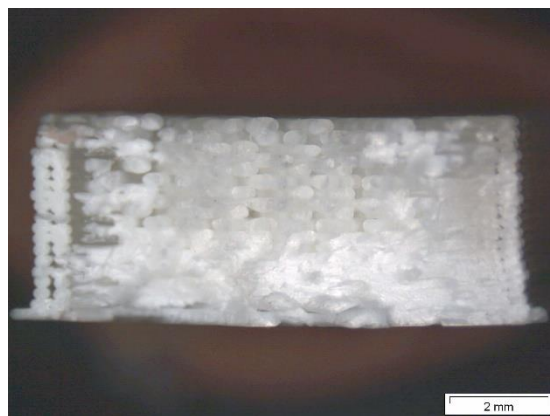


Exp #8 - Cód 7

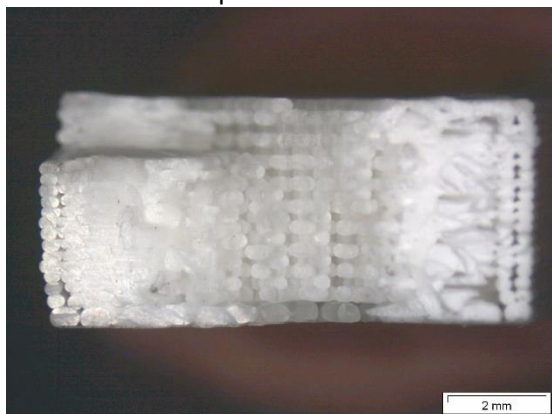




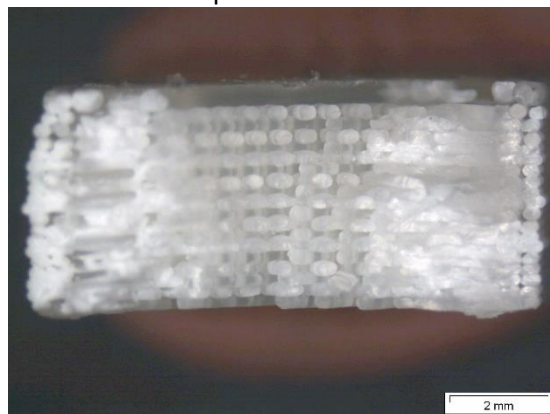
Exp #9 - Cód 8



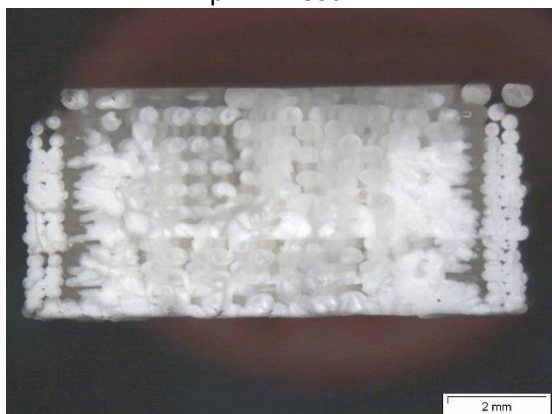
Exp #10 - Cód 9



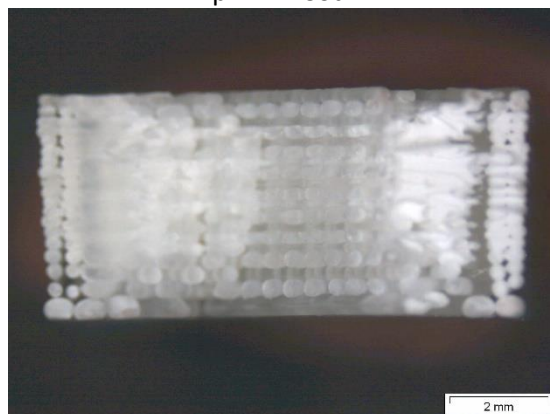
Exp #11 - Cód A



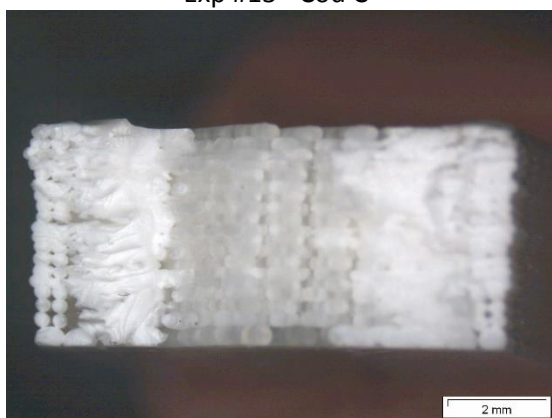
Exp #12 - Cód B



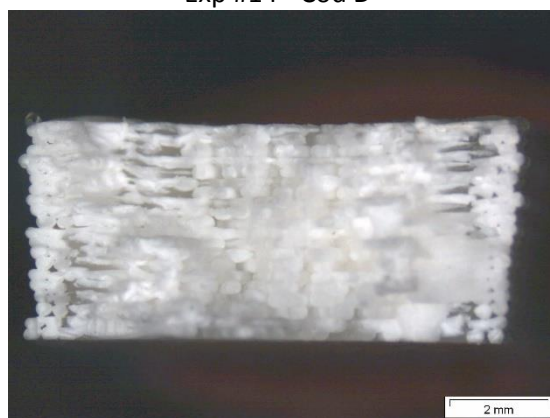
Exp #13 - Cód C



Exp #14 - Cód D



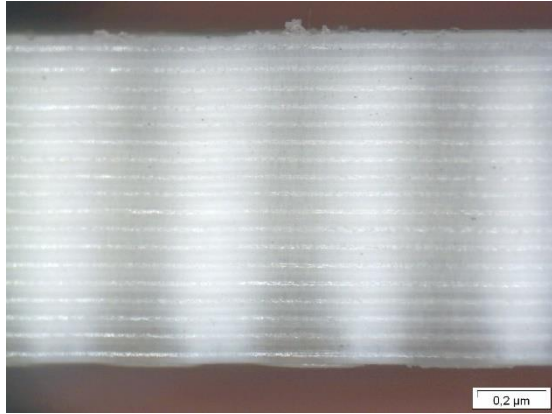
Exp #15 - Cód E



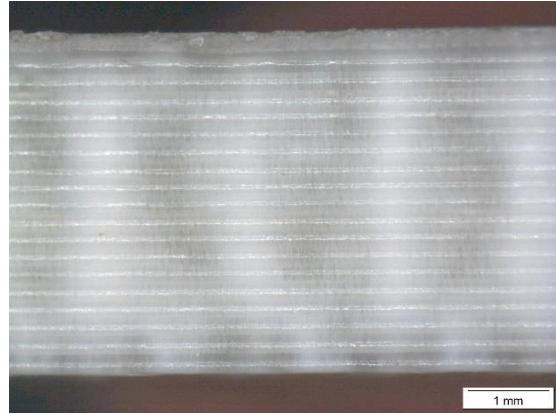
Exp #16 - Cód F



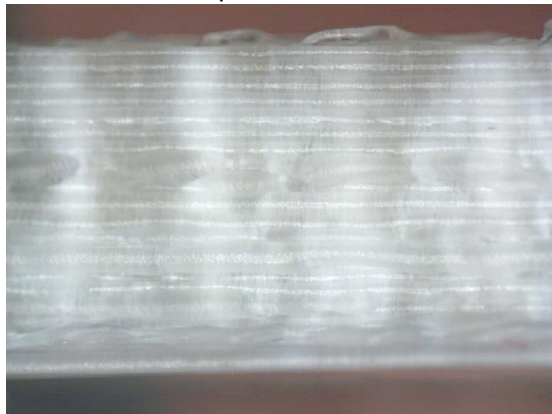
Imágenes laterales de la zona próxima a la fractura



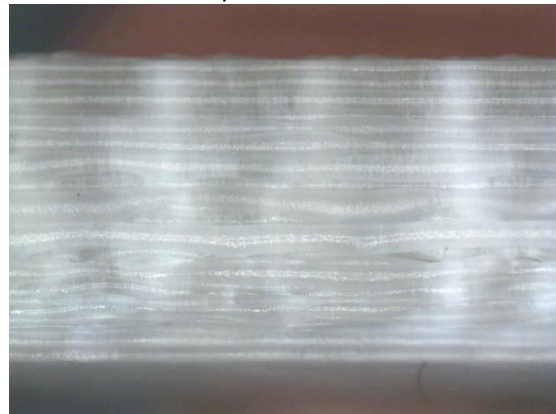
Exp #1 - Cód 0



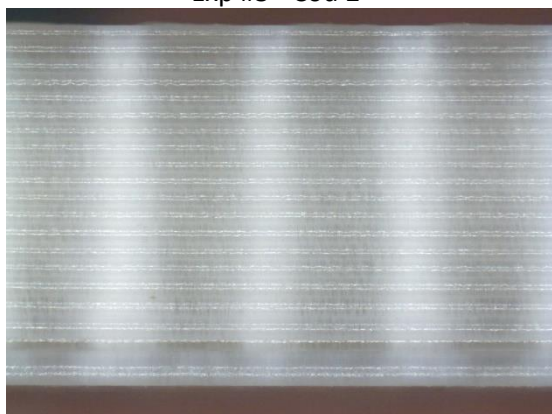
Exp #2 - Cód 1



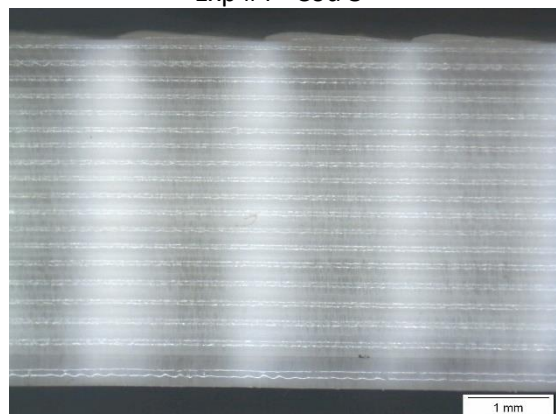
Exp #3 - Cód 2



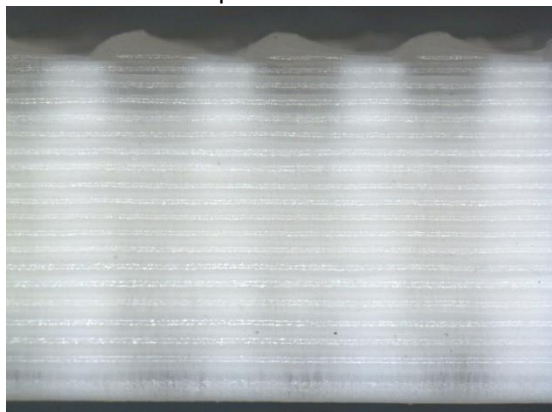
Exp #4 - Cód 3



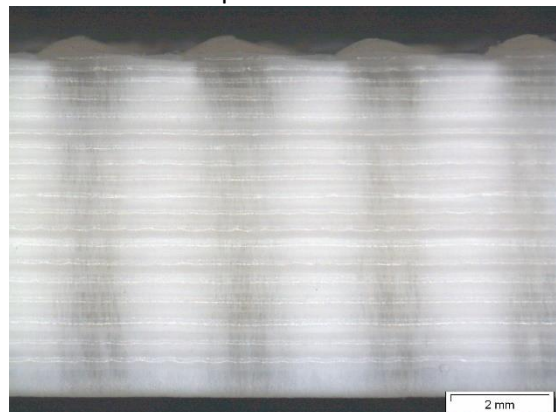
Exp #5 - Cód 4



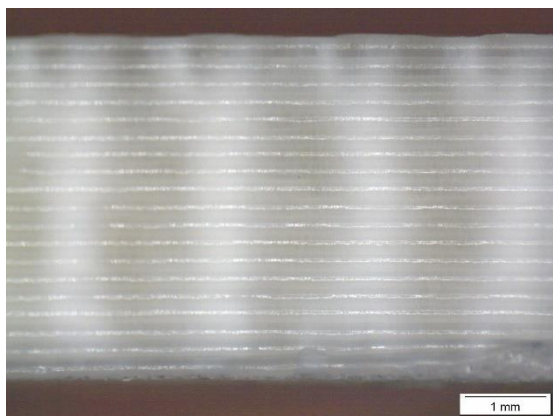
Exp #6 - Cód 5



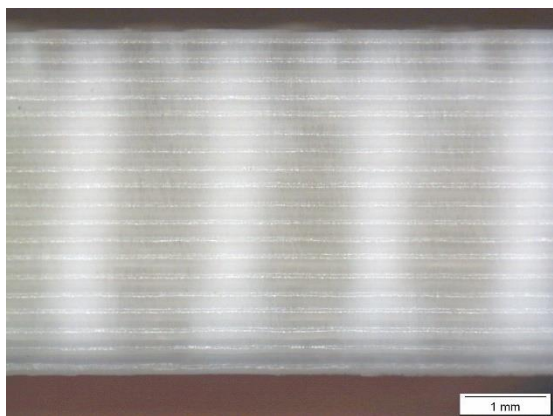
Exp #7 - Cód 6



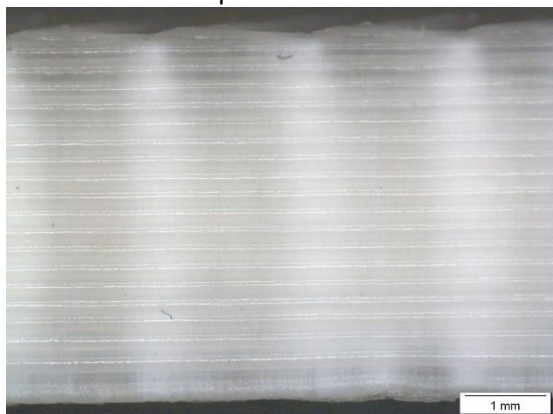
Exp #8 - Cód 7



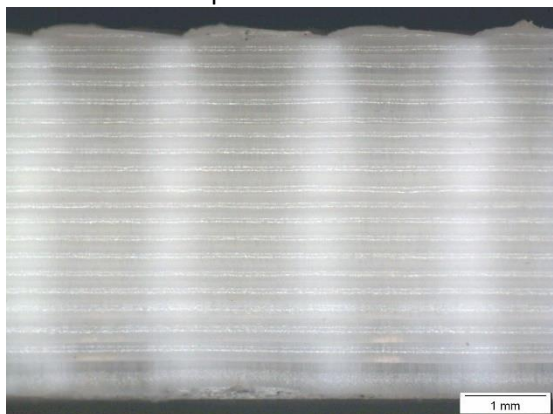
Exp #9 - Cód 8



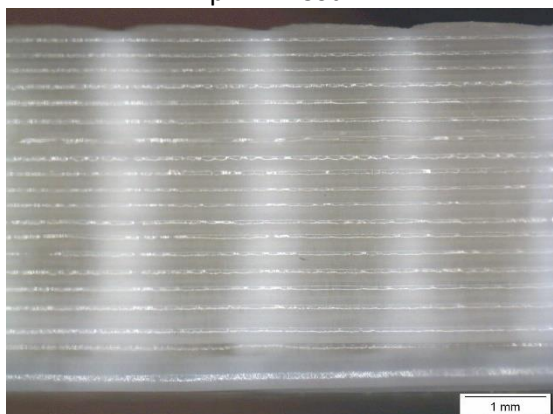
Exp #10 - Cód 9



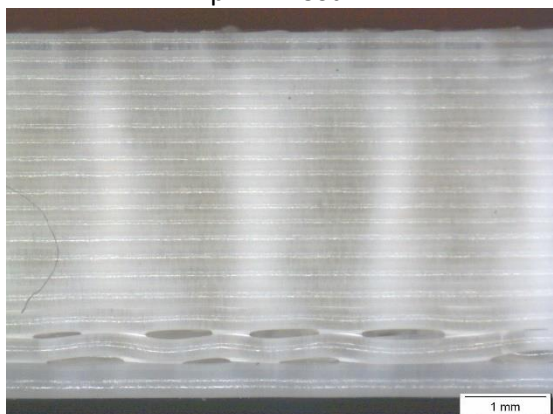
Exp #11 - Cód A



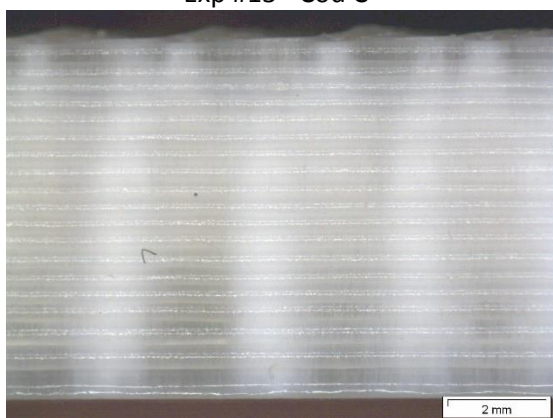
Exp #12 - Cód B



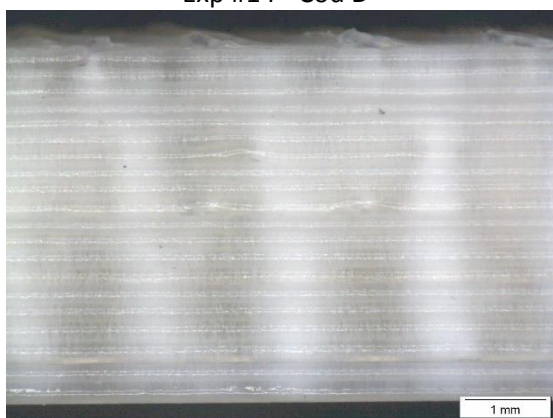
Exp #13 - Cód C



Exp #14 - Cód D



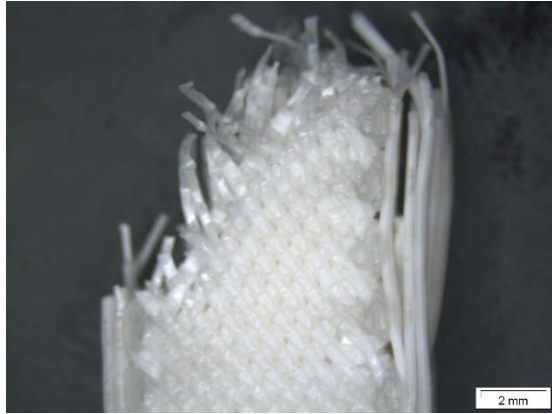
Exp #15 - Cód E



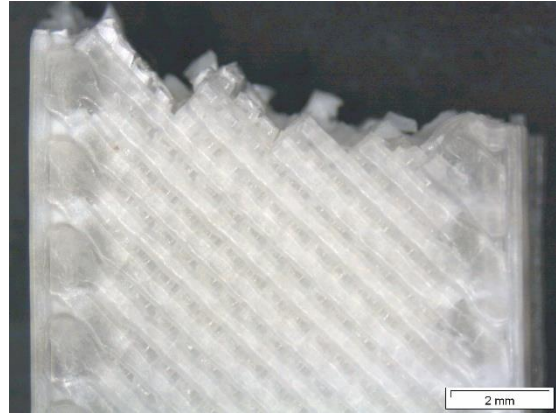
Exp #16 - Cód F



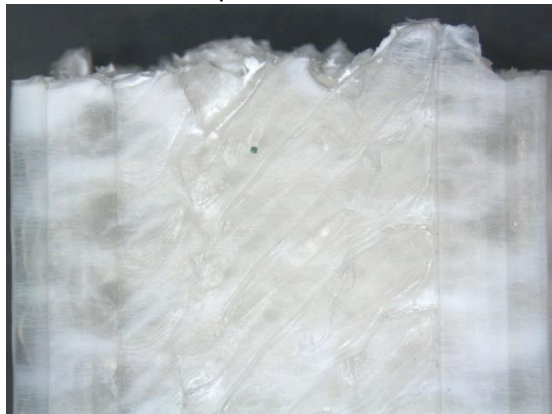
Imágenes de la planta inferior del área próxima a la superficie de fractura



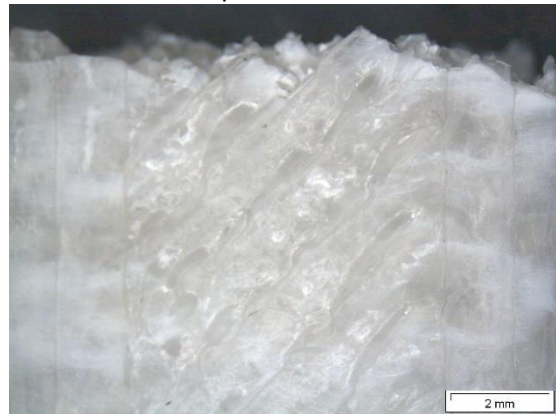
Exp #1 - Cód 0



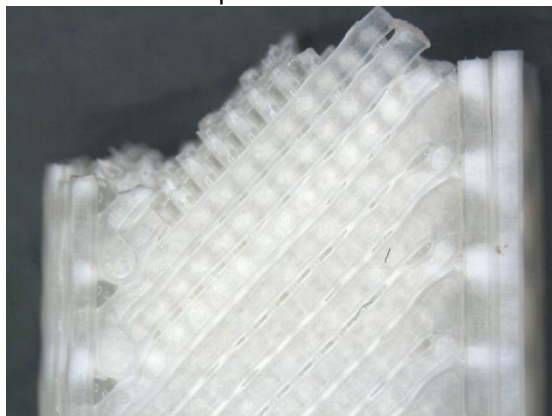
Exp #2 - Cód 1



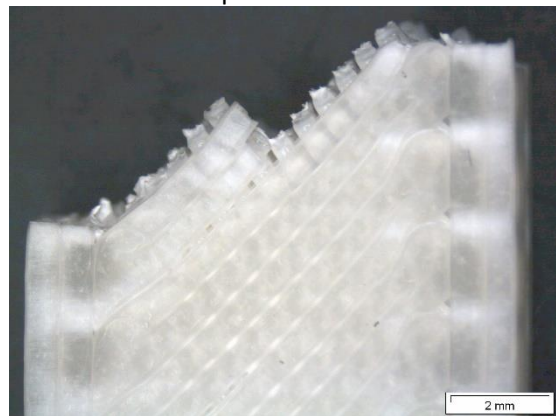
Exp #3 - Cód 2



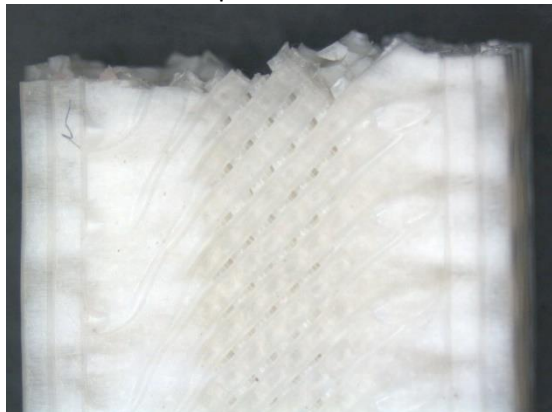
Exp #4 - Cód 3



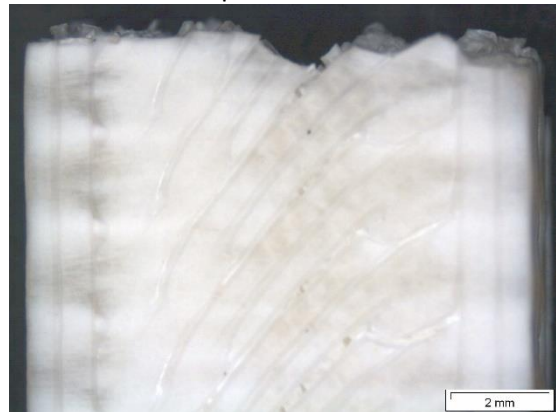
Exp #5 - Cód 4



Exp #6 - Cód 5



Exp #7 - Cód 6



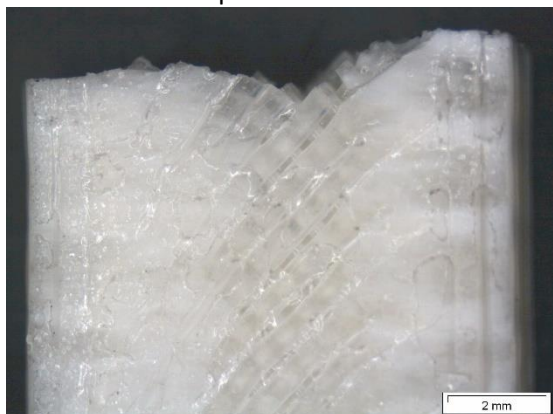
Exp #8 - Cód 7



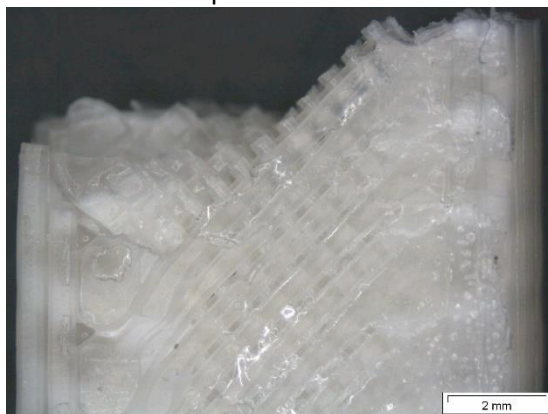
Exp #9 - Cód 8



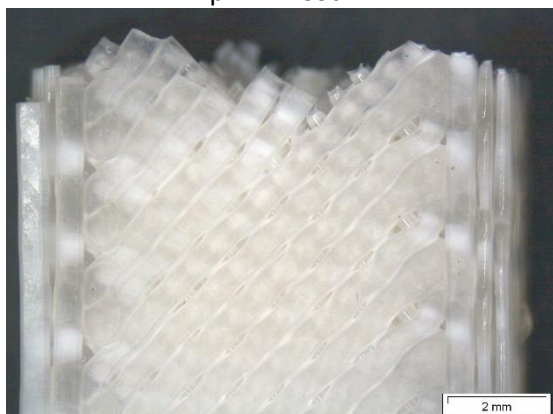
Exp #10 - Cód 9



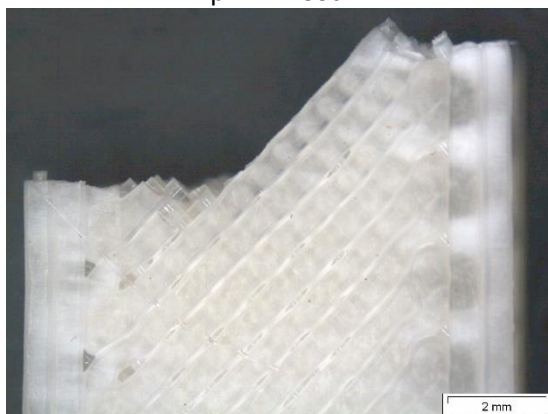
Exp #11 - Cód A



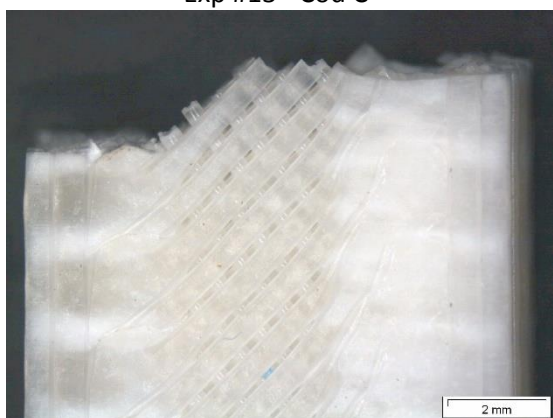
Exp #12 - Cód B



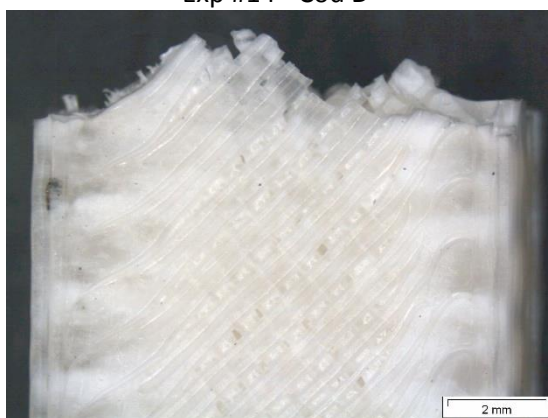
Exp #13 - Cód C



Exp #14 - Cód D



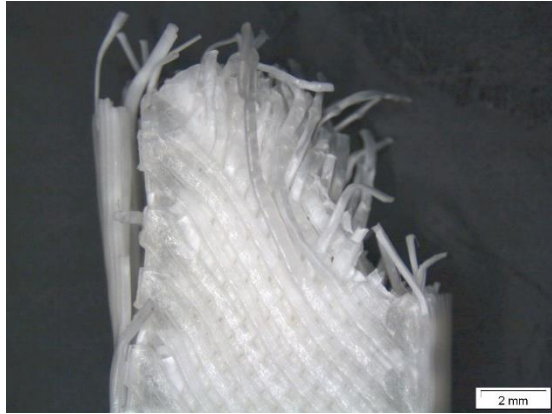
Exp #15 - Cód E



Exp #16 - Cód F



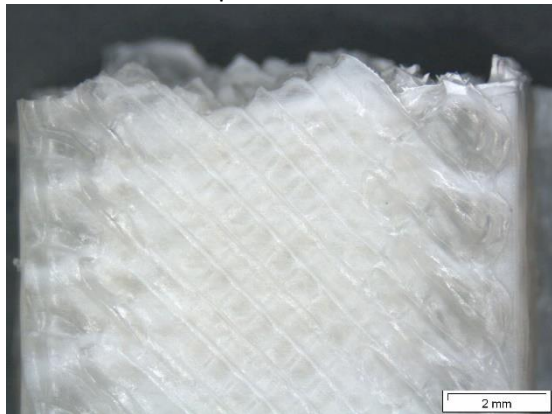
Imágenes de la planta superior del área próxima a la superficie de fractura



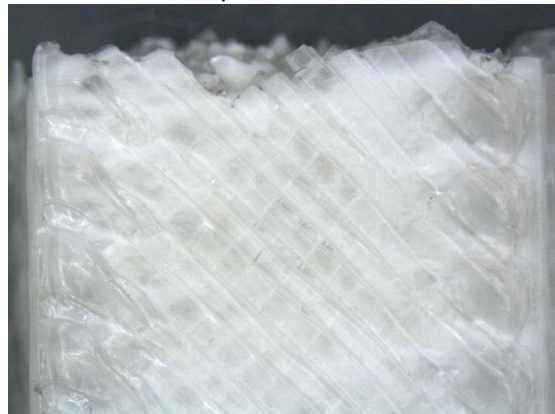
Exp #1 - Cód 0



Exp #2 - Cód 1



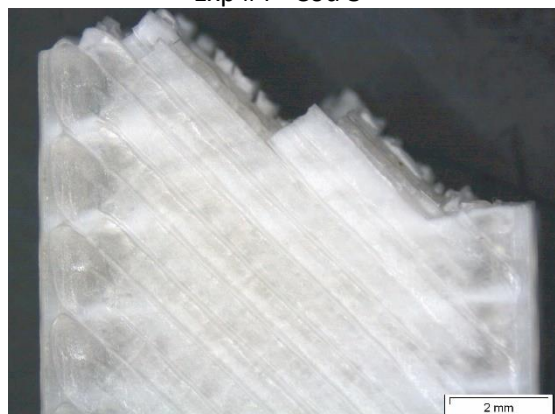
Exp #3 - Cód 2



Exp #4 - Cód 3



Exp #5 - Cód 4



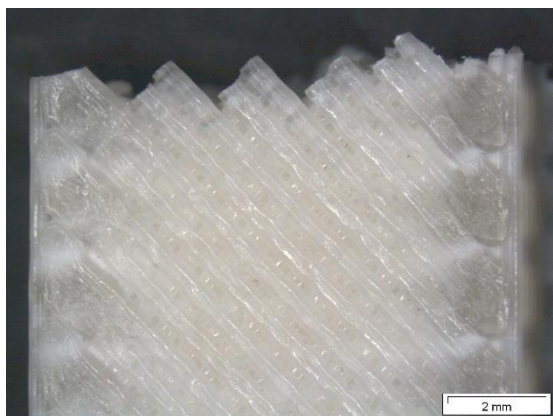
Exp #6 - Cód 5



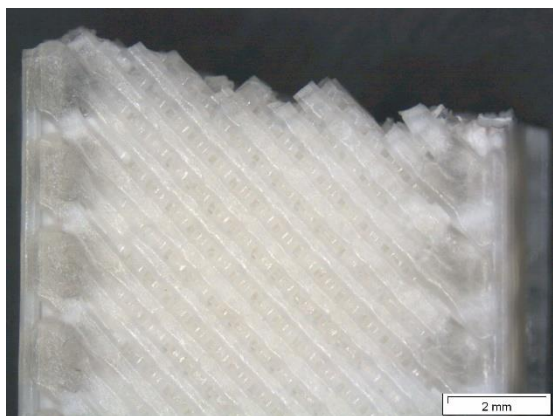
Exp #7 - Cód 6



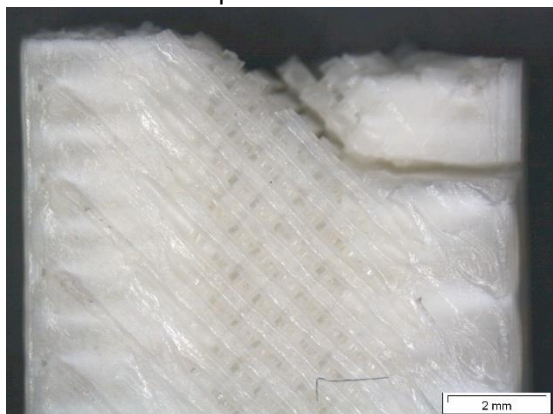
Exp #8 - Cód 7



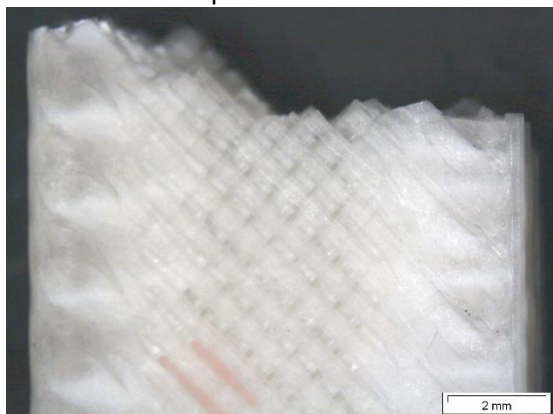
Exp #9 - Cód 8



Exp #10 - Cód 9



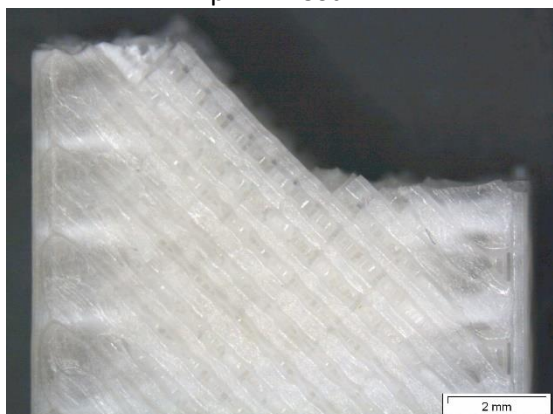
Exp #11 - Cód A



Exp #12 - Cód B



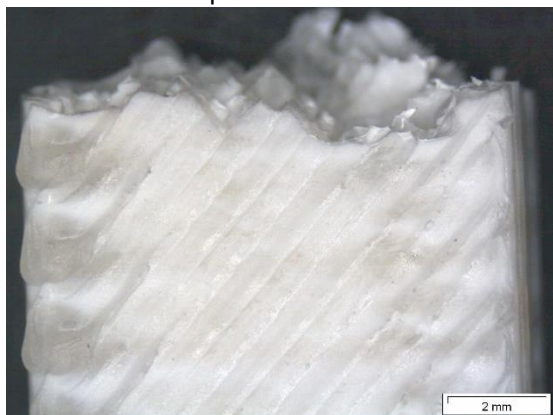
Exp #13 - Cód C



Exp #14 - Cód D



Exp #15 - Cód E



Exp #16 - Cód F

**\*Nota:** Es necesario objetar que cuando se comenzó la captura de imágenes, el software empleado en el PC estaba desconfigurado y presentaba las escalas incorrectas. Se calibró y en la mayor parte de fotografías aparece la escala correcta. No obstante, en la *Tabla 1* se recogen las correcciones pertinentes aplicables a todas las capturas de cada tipo.

Tipo de captura	Escala
Imágenes frontales de la fractura	2 mm
Imágenes laterales de la zona próxima a la fractura	1 mm
Imágenes de la planta inferior del área próxima a la superficie de fractura	2 mm
Imágenes de la planta superior del área próxima a la superficie de fractura	2 mm

*Tabla 1. Escala para cada tipo de captura al microscopio estereoscópico*